

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

MKP analýza stavebnicových systémů

FEM Analysis of Modular Systems

Student: Jakub Vasko

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Vasko**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika
Téma: MKP analýza stavebnicových systémů
FEM Analysis of Modular Systems

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Stavebnicové systémy a jejich použití.
2. Modelování a analýza sestavy (MKP, analyticky).
3. Modelování a analýza komponent (MKP, analyticky).
4. Řešení detailů a submodeling (MKP).
5. Vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LENERT, J.: Pružnost a pevnost I, II, Ostrava, Skripta VŠB-TU Ostrava.
- [2] LENERT, J.: Úvod do metody konečných prvků 1, Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 1999, 109s., ISBN 80-7078-686-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Jaroslava Rojíčka, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), zejména § 35 (užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen "VŠB-TUO") má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3, autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst.4, autorského zákona,
- užít toto své dílo nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které by byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů,
- беру на ве́домі́, že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Jakub Vasko

Adresa trvalého pobytu autora práce: Želivského 2/1341, Havířov-Podlesí, 736 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VASKO, J. *MKP analýza stavebnicových systémů: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky a řízení, 2019, 52 s. Vedoucí práce: Rojíček, J.

Bakalářská práce se zabývá analýzou stavebnicových systémů pomocí metody konečných prvků. V úvodu jsou představeny různé typy stavebnicových systémů a jejich využití v praxi. Zaměřím se na schůdky, které navrhnu s dvěma různými schody. Jeden schod s větší pracovní plochou do 120 kg a druhý s menší pracovní plochou do 150 kg. Provedu analýzu metodou konečných prvků tohoto systému, především se zaměřím na napětí a posuvy. V dalším kroku provedu analýzu jednotlivých schodů. Poté se podle výsledků z analýzy celého systému zaměřím na nejvíce namáhaný díl tohoto systému a provedu submodeling tohoto dílu.

Klíčová slova: Stavebnicový systém, MKP, Stavebnice, Schůdky, Napětí, Posuvy

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VASKO, J. *FEM Analysis of Modular Systems*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of applied mechanics, 2019, 52 p. Thesis head: Rojíček, J.

The bachelor thesis deals with the analysis of modular systems using finite element method. First I introduce various types of modular systems and their use in practice. I will focus on the stepladder which i will design with two different steps. One step with a larger working area which can hold up to 120 kg and the other one with a smaller working area up to 150 kg. I will analyze the system by finite element method, especially with focus on stress and deformation. The next step is to analyze the individual steps. Then, based on the results of the whole system analysis, I will focus on the most stressed part of this system and create submodel of this part.

Key words: Modular system, FEM, Building kit, Stepladder, Stress, Deformation

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	1
Úvod	2
1 Stavebnicové systémy a jejich použití.....	3
1.1 Stavebnice.....	3
1.1.1 SEVA	3
1.1.2 MERKUR	5
1.1.3 LEGO	6
1.2 Lešení	8
1.3 Schůdky	9
1.4 Norma EN 131	10
1.4.1 Šířka základny	10
1.4.2 Test trvalého zatížení.....	11
1.4.3 Zamezení odejmutí jednotlivých dílů žebříku	11
2 Modelování a analýza sestavy.....	12
2.1 Popis konstrukce	12
2.1.1 Noha	13
2.1.2 Schod.....	14
2.1.3 Spojovací materiál.....	15
2.2 Materiál.....	16
2.3 Vazby a okrajové podmínky.....	16
2.4 Zatížení	19
2.5 Mesh.....	20
2.5.1 Konvergence.....	20
2.6 Výsledky	21
2.6.1 Posuvy	21
2.6.2 Napětí	23
2.6.3 Reakce	25
3 Modelování a analýza komponent	26

3.1	Schod do 120 kg.....	26
3.1.1	Okrajové podmínky.....	27
3.1.2	Výsledky posuvů	30
3.1.3	Výsledky napětí	31
3.2	Schod do 150 kg.....	32
3.2.1	Okrajové podmínky.....	33
3.2.2	Výsledky posuvů	36
3.2.3	Výsledky napětí	37
4	Řešení detailů a submodeling.....	39
4.1	Vazby a okrajové podmínky.....	40
4.2	Mesh.....	41
4.3	Výsledky	42
5	Vyhodnocení	45
5.1	Vyhodnocení schůdků.....	45
5.2	Vyhodnocení obecných postupů	46
	Závěr.....	47
	Seznam použitých pramenů a literatury	49
	Seznam tabulek	50
	Seznam obrázků.....	51

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
l	Délka	m
V	Objem	m^3
m	Hmotnost	kg
R_m	Mez pevnosti	MPa
ρ	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
F	Síla	N
g	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
k	Koeficient bezpečnosti	-
σ_{red}	Redukované napětí	MPa
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
μ	Poissonovo číslo	-

Úvod

Pokud bych měl definovat slovo stavebnice, tak lze jednoduše říci, že stavebnice je hračka, která se skládá z dílků, jejich složením vznikají různé sestavy nebo modely. Taktéž stavebnice mohou být z různých materiálů a různé jsou i techniky sestavování. Stavebnice nás provází již od útlého věku a je zajímavé si uvědomit, jaký má význam při rozvíjení myšlení, či technické představivosti. *"Předměty a jevy, které působí na naše smysly, existují v určitém prostoru a jsou charakterizovány určitými prostorovými kvalitami: šířkou, délkou a výškou. Prostorové vnímání zahrnuje vnímání tvaru, hloubky a pohybu v prostoru. Objekty v prostoru nevnímáme stejně, některé vystupují, odlišujeme je od ostatních."* (Pardel, 1983, s. 58). No a od stavebnice je to jen krůček ke schůdkům.

Motivací k výběru tématu mé bakalářské práce byly nejen profesní, ale i osobní důvody. Při práci se často setkávám, a to nejen přímo v praxi, ale i v rámci školení v oblasti BOZP s používáním různých schůdků, lešení či konstrukcí. A člověk si až posléze uvědomí, že i tato relativně jednoduchá věc prošla svým vývoje a jde neustále kupředu. Schůdky musí být navrženy tak, aby nedošlo k ohrožení stability nebo tuhosti konstrukce a zároveň splňovaly platné normy.

Tato práce, zabývající se analýzou stavebnicových systémů, je složená ze čtyř částí, kdy v úvodu jsou představeny různé typy stavebnicových systémů a jejich využití v praxi. Analýze sestavy je věnována druhá část a schůdky jsou zde představeny co by rozebíratelný stavebnicový systém. Následující část je zaměřena na testování dvou typů schodů, přičemž je jeden schod s větší pracovní plochou do 120 kg a druhý s menší pracovní plochou do 150 kg. V závěrečné kapitole z výsledků předešlé analýzy celého systému je pozornost věnována nejvíce namáhanému místu tohoto systému a provedení submodelingu tohoto místa.

1 Stavebnicové systémy a jejich použití

V životě nás obklopuje velké množství stavebnicových systémů, které byly vyvinuty pro uživatele s rozdílnými požadavky. Jedná se o sestavy, které se skládají z více prvků a dají se přizpůsobit pro více aplikací.

Stavebnicový systém může být například skříň, u které se dají police přesunout do různých poloh. Flexibilní stavebnicový systém tak umožňuje kombinování podle potřeby, neboť každý si skříň uzpůsobí pro vlastní aplikaci. V domácnosti můžeme dále narazit na modulové sedací soupravy nebo obývací stěny. Dále to jsou různé stavebnice jako je SEVA, Merkur či Lego, v praxi různé roboty, potrubí nebo lešení a ve výrobě nějaký prvek, který se vyrábí ve stejném formátu pro více různých konstrukcí. Předností stavebnicového systému je jeho variabilita.

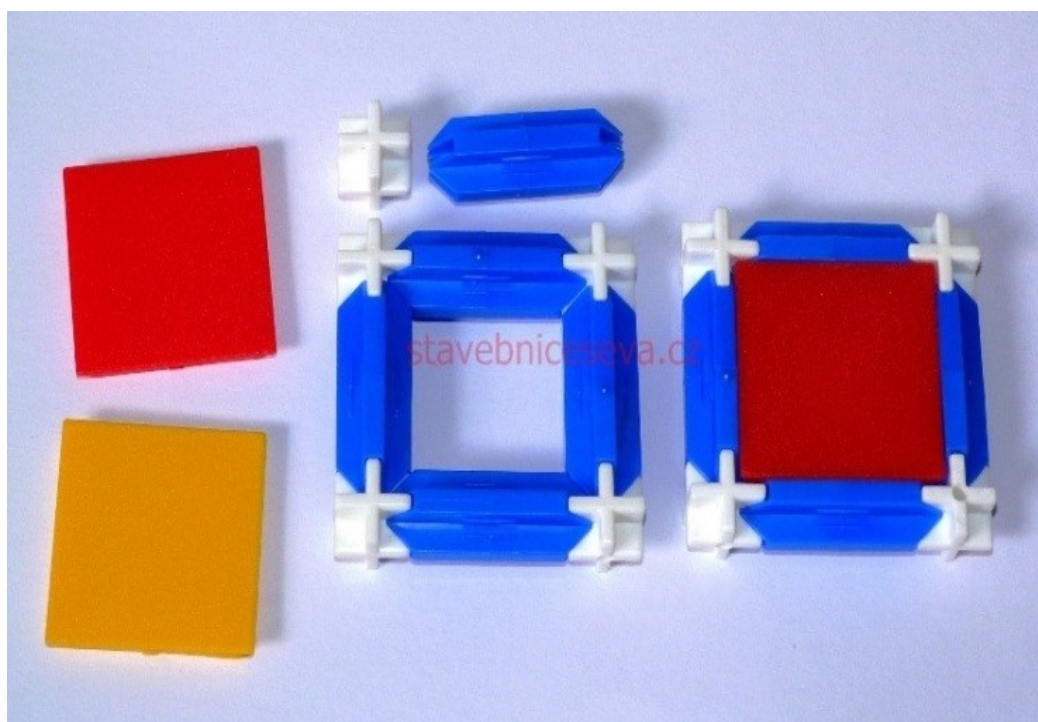
V následující kapitole se podíváme na několik vybraných stavebnic.

1.1 Stavebnice

Slavík (2012, s. 149) vymezuje v obecné rovině pojem stavebnice v rámci pedagogiky „jako sadu určitých předmětů k sestavování a spojování do libovolných nebo přesně vymezených celků, k jejich montáži a demontáži. Mechanických stavebnic v dnešní době existuje velké množství od jednoduchých kostek až po propracované typy, které umožňují vytvářet modely složitých strojů a stavebnicových celků.“

1.1.1 SEVA

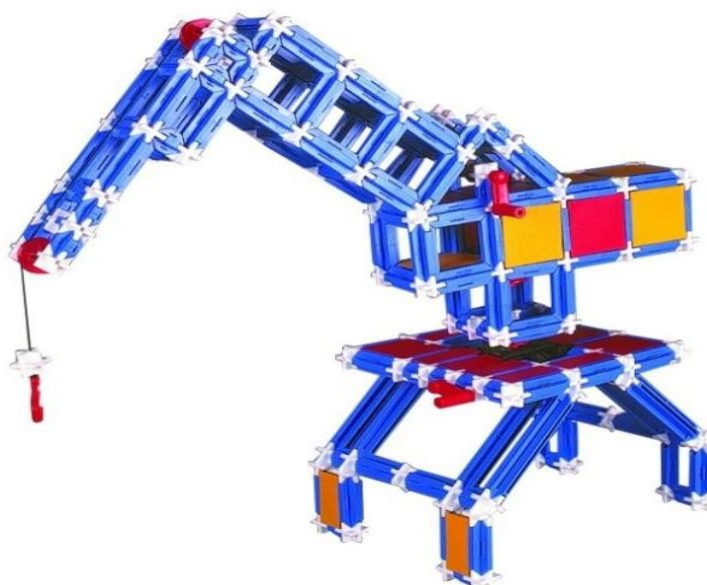
Stavebnice SEVA je český výrobek, který byl uveden na trh v roce 1979. Tato variabilní polytechnická stavebnice umožňuje sestavit téměř vše. Z počátku byly základní díly modré a bílé, kdy modrá za tu dobu vystřídala několik odstínů. Až po 30 letech se SEVA začala vyrábět také v hnědé, šedé růžové, fialové, zelené a dalších barvách. Tato stavebnice pro děti pomohla vychovat již několik generací konstruktérů, designérů, zámečníků a nespočet dalších uměleckých a technických profesí. Za jejím úspěchem stojí jednoduchost, a to pouhé tři základní dílky, kdy modré kostičky se spojují pomocí bílých křížů do požadovaných tvarů a poté lze vložit výplň, jak dokládá níže uvedený obrázek 1.1.



Obrázek 1.1 - Základní díly stavebnice SEVA

Zdroj: <https://www.stavebniceseva.cz/STAVEBNICE-SEVA/>

SEVA je určena ke stavbě běžných prostorových objektů, ať už to jsou domy, auta, letadlo, jeřáb, traktor, nábytek, zvířátka (viz obr. 1.2).

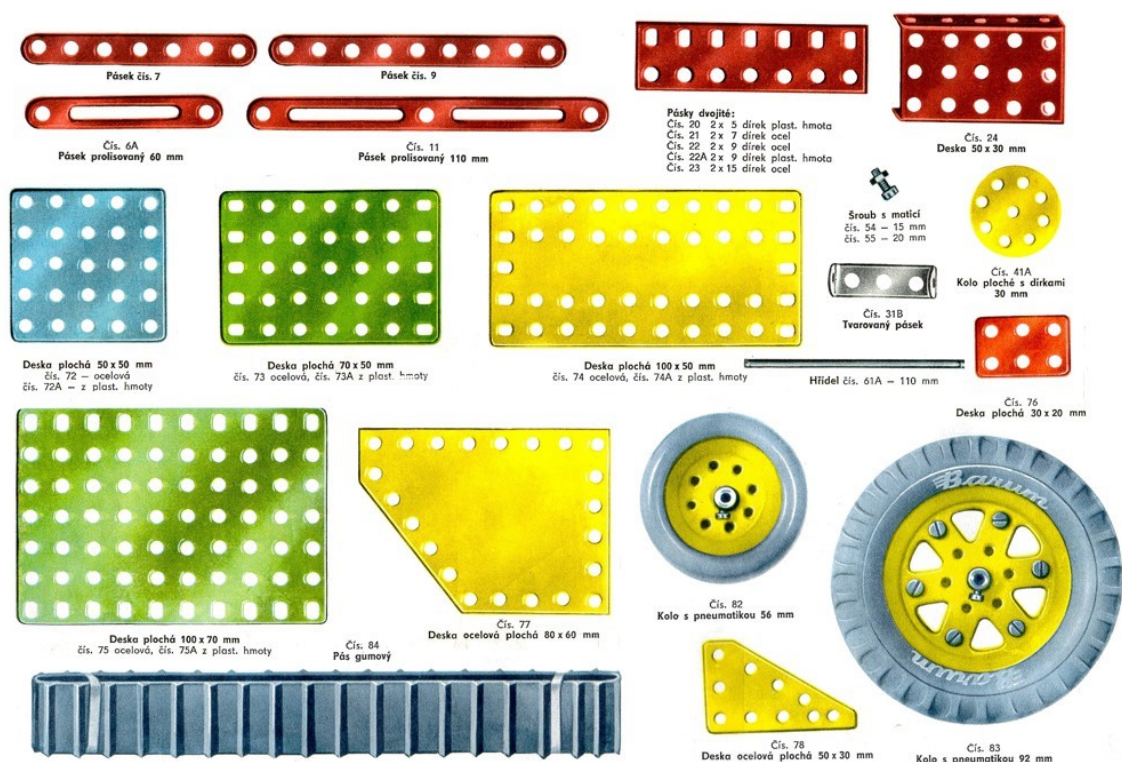


Obrázek 1.2 - Jeřáb

Zdroj: https://stavebnice.org/683-superlarge_default/stavebnice-seva-5-technic.jpg

1.1.2 MERKUR

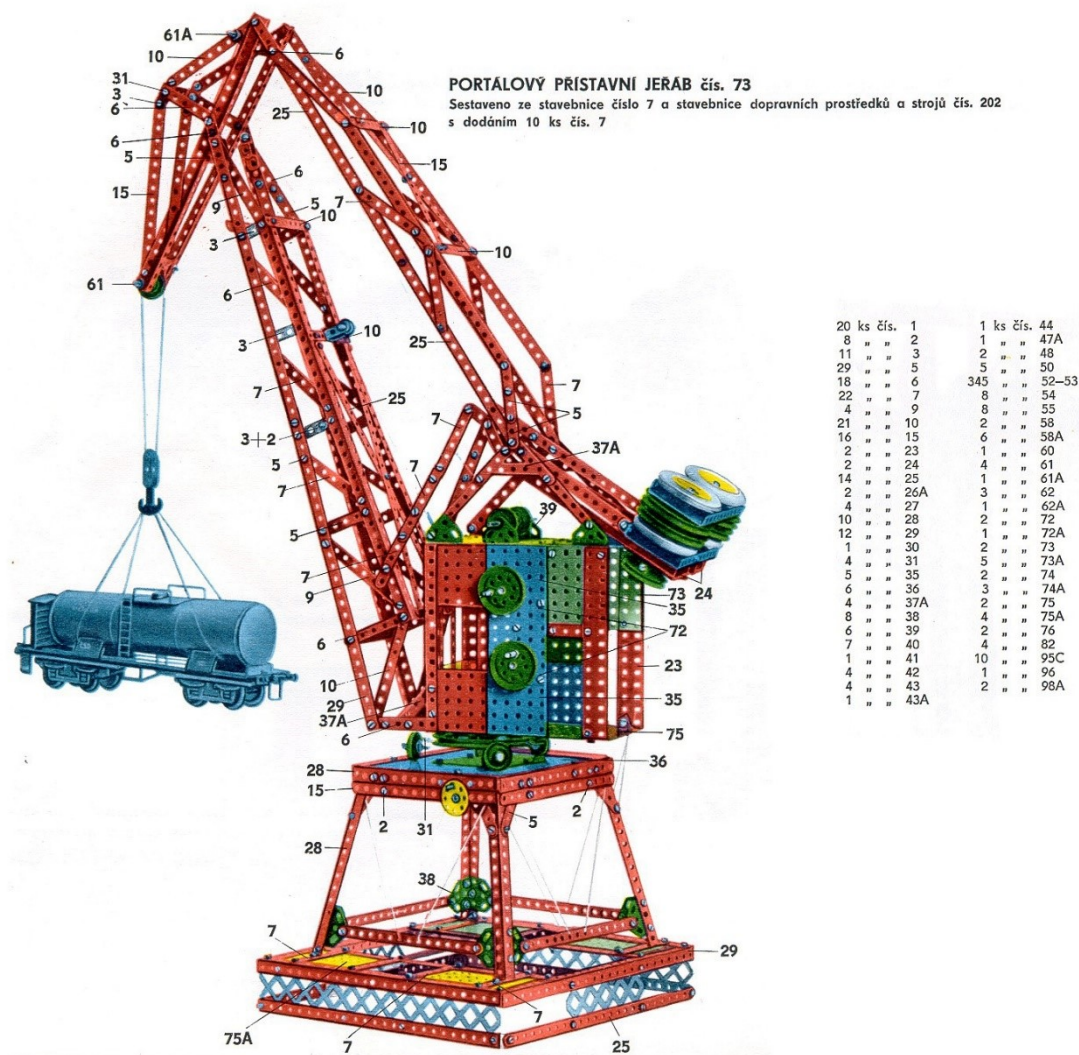
Českou stavebnici MERKUR jistě není nutno dlouze představovat, neboť je na trhu od roku 1925. Znají ji nejen současné děti, ale i jejich rodiče a prarodiče. Stavebnice využívá systém spojování jednotlivých dílů pomocí šroubků a maticek. Všechny díly stavebnice jsou kovové (kromě několika druhů plastových výplní nebo kol) a spojují se šroubky. K dispozici jsou základní stavební profily a dále různé typy kol, osy, převody a osazení (viz obr. 1.3).



Obrázek 1.3 - Stavebnicové díly MERKUR

Zdroj: <http://merkur.kreteni.cz/60stavebnice-70sedmickadeluxe.php>

Se stavebnicí MERKUR, zaměřenou na nějakou činnost, můžete stavět např. zemědělské stroje, vojenskou techniku, požární auta, letecké modely či portálový přístavní jeřáb znázorněný na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4 - Model portálového přístavního jeřábu

Zdroj: http://merkur.kreteni.cz/_img/predlohy/1972/41_150.jpg

1.1.3 LEGO

LEGO Group je dánská firma založena v roce 1932, LEGO je zkratkou dvou dánských slov "leg godt", která znamenají "dobrou hru". V dnešní době patří mezi nejrozšířenější stavebnice na světě.

Podoba současné plastové kostky vznikla v roce 1958 a princip spojování umožňuje prakticky nekonečné spojování kostek. Mimo stavebních kostek je zde velká řada konečných prvků jako vlajky, postavičky a podobné. Na obrázku 1.5 vidíme ukázkou základních kostek a na obrázku 1.6 výsledný produkt.



Obrázek 1.5 - Kostky stavebnice LEGO

Zdroj: http://www.kostky.biz/fotky45881/fotos/_vyr_33233kg004.jpg



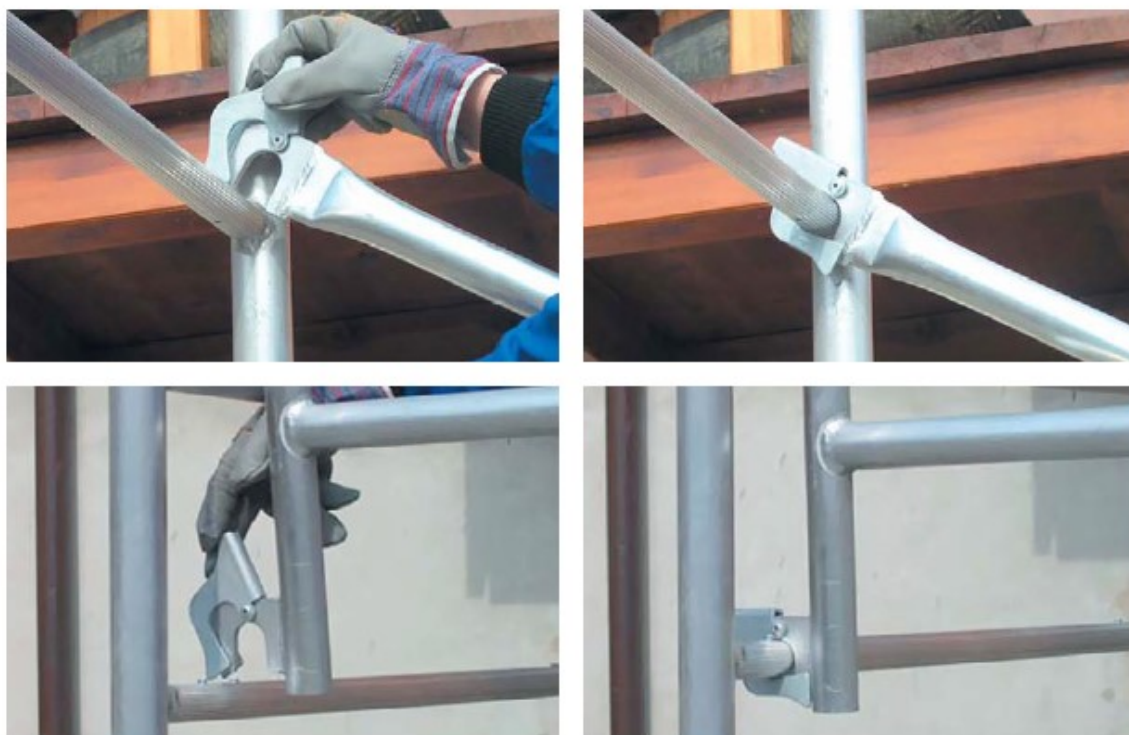
Obrázek 1.6 - Produkt stavebnice LEGO

Zdroj: <https://www.dzunglehracek.cz/images/product/158/s1.jpg>

1.2 Lešení

Lešení se používá na staveništích, kde je potřeba vykonat nějakou práci ve výškách. Mohou to být lešení která jsou pevně ukotvena na jednom místě, nebo pojízdná lešení. Konstrukce těchto lešení by měla být co nejjednodušší a nejbezpečnější.


Lešení se skládá z trubek, nebo trubkových dílů, které jsou do sebe spojovány spojovacím materiálem, například závlačkami. Lešení vyrábí spousta výrobců, proto jsou způsoby spojování různé. Na obrázku 1.7 máme ukázkou spojování konstrukce.



Obrázek 1.7 - Spojování konstrukce

Zdroj: <https://www.leseni-alfix.cz/>


Na lešení je dobře vidět princip stavebnicového systému, kde ze stejných dílů jsme schopni postavit různě vysoké konstrukce. Pro příklad na obrázku 1.8 máme znázorněnou modelovou řadu pojízdného lešení, kterou lze složit do osmi různých výšek, od nejmenší výšky 3,2 metrů po nejvyšší variantu 10,65 metrů.




ALFIX
PRODEJ A PRONÁJEM LEŠENÍ

Pojízdné lešení 5000

2,7 x 0,8 m



ALFIX
PRODEJ A PRONÁJEM LEŠENÍ



Nosnost horní plošiny:
300 kg rovnoměrného zatížení

Velikost pracovní plochy:
2,70 x 0,60 m


Rozměry lešení:
2,70 x 0,80 m

Velikost plochy lešení s pojízdným rámem:
2,70 x 2,00 m


Maximální zatížení podlahy:
200 kg/m²

Maximální pracovní výška:
10,65 m

Různé pozice na pojízdném rámu:



Typy 5002-5009 odpovídají všem požadavkům
ČSN 73 8102, ČSN EN 1004, ČSN EN 1298




Název příslušenství	Typ	5002	5003	5004	5005	5006	5007	5008	5009
1 Vertikální rám 1,95 x 0,80 m	30 01 596	2	2	4	4	6	6	8	8
2 Vertikální rám 1,12 x 0,80 m	30 01 512	-	2	-	2	-	2	-	2
3 Základní 2,70 m	30 03 090	2	2	2	2	2	2	2	2
4 Podlážka bez otvoru	30 02 031	-	-	1	1	1	1	1	1
5 Podlážka s otvorem	30 02 030	1	1	1	2	2	2	2	3
6 Diagonála 2,70 m	30 04 560	2	2	4	4	6	6	8	10
7 Podlážka vzpěra 2,70 m	30 08 610	-	2	-	2	2	2	2	4
8 Kolečko Ø 200 mm	30 06 201	4	4	4	4	4	4	4	4
9 Pojistka	30 06 250	-	4	8	12	12	16	20	20
10 Pojízdný ocelový rám 5000	30 07 500	-	-	2	2	2	2	2	2
11 Okopová zarážka podélná	30 05 610	-	2	2	2	2	2	2	2
12 Okopová zarážka příčná	30 05 520	-	2	2	2	2	2	2	2
13 Zluzující příhrada	-	-	-	-	-	-	1	1	1

Zatížení svařem
umístění svařem k rámu a podle
sahování

Číslo v tabulce odpovídá 1 kg závaží = 10 kg

na střed / bez stabilizátoru	na straně / bez stabilizátoru	na střed / 2x stabilizátor	na straně / 4x stabilizátor	na střed / bez stabilizátoru	na straně / bez stabilizátoru	na střed / 2x stabilizátor	na straně / 4x stabilizátor
-	-	-	-	4	8	8	8
-	-	2	4	6	8	10	10
-	-	-	-	2	2	2	2
-	-	-	-	-	-	-	-
4	x	x	x	x	x	x	x
-	-	-	-	12	20	28	36
-	2	6	10	20	28	36	x
-	-	-	-	4	6	10	x
-	-	-	-	2	6	10	x
-	-	-	-	-	-	8	x
16	x	x	x	x	x	x	x

x - nezpůsobuje normu ČSN EN 1004



	5002	5003	5004	5005	5006	5007	5008	5009
Pracovní výška (m)	3,20	4,30	5,60	6,75	7,60	8,70	9,55	10,65
Výška lešení (m)	2,45	3,55	4,85	6,00	6,80	7,95	8,80	9,90
Výška podlahy (m)	1,20	2,30	3,60	4,75	5,60	6,70	7,55	8,65
Hmotnost (kg)	85	133	187	228	240	262	285	311

Obrázek 1.8 - Modelová řada lešení Alfix

Zdroj: <https://www.leseni-alfix.cz/>

1.3 Schůdky

Schůdky jsou ideálním pomocníkem pro všechny, jsou určené pro krátkodobou práci ve výšce, kde člověk bez pomoci nedosáhne, nejsou vhodné pro dlouhodobou práci. V praxi je na většině z nich zakázáno používat i velké nářadí jako sbíječky. Většina těchto schůdek je vyrobena z hliníku.

Na rozdíl od předchozích příkladů, kde komponentní systém byl skládán až koncovým uživatelem, je tento produkt skládán již ve výrobě. Skládá se ze schodu, který je v každém patře stejný a rozdílně dlouhých nohou stejného profilu a kde na základě požadovaného počtu schodů je rozdílná délka profilu (viz obr. 1.9).



Obrázek 1.9 - Schůdky

Zdroj: <https://www.alza.cz>

1.4 Norma EN 131

Od 1.1.2018 vstoupila v platnost aktualizovaná verze evropské normy EN 131, určená pro výrobu žebříků a schůdků. Důvodem aktualizace je zvýšení bezpečnosti a rozdělení žebříků do kategorií.

Podle této normy musí žebříky splňovat doplňující a přísnější testy:

- šířka základny
- test pevnosti bočnic
- test zkroucení u stojanových žebříků
- test trvalého zatížení
- test skluzu základny
- test zkroucení u opěrných žebříků

1.4.1 Šířka základny

Pro zvýšení bezpečnosti při práci ve výškách jsou všechny jednoduché, výsuvné a univerzální žebříky, které lze použít jako opěrné žebříky a při vysunutí jsou delší než 3 metry opatřeny rozšířenou základnou – stabilizačním prvkem/stabilizátorem. Tento komponent dodává větší stabilitu základny a zamezí bočnímu náklonu žebříku při práci ve výšce.

1.4.2 Test trvalého zatížení

Tento test provádějí všechny akreditované zkušebny v Evropě. Test se provádí na samostatně stojícím žebříku/schůdku a simuluje tzv. "kročejový efekt", tzv. kolik výstupů (kroků) vydrží daný výrobek bez poškození.

Nově jsou zavedeny dvě kategorie:

- 1) neprofesionální kategorie – určená pro domácí použití a lehké, příležitostné používání s minimální životností 10 000 cyklů,
- 2) profesionální kategorie – vhodná pro řemeslníky, firmy a intenzivní, časté používání s minimální životností 50 000 cyklů.

1.4.3 Zamezení odejmutí jednotlivých dílů žebříku

U žebříků, které jsou delší než 3 metry a které lze použít také jako žebříky opěrné, není možné úzký díl použít jako samostatný jednodílný žebřík. Tyto úzké díly jsou opatřeny pevnou zarážkou, která zamezuje jejich oddělení.

2 Modelování a analýza sestavy

V předchozí kapitole jsem ukázal několik typů stavebnicových systémů. Pro analýzu jsem vybral schůdky, které mají využití v praxi. Vzhledem ke složitosti popisované konstrukce jsem se rozhodl vynechat analytické řešení, které by vedlo na matematickou metodu, jenž je obdobná MKP.

2.1 Popis konstrukce

Schůdky se skládají ze čtyř nohou a jednotlivých schodů. Pro analýzu sestavy jsem vybral maximální velikost schůdků. Schůdky jsou jako stavebnicový systém rozebíratelné, proto je na připevnění nohy a schodu použit vždy jen jeden spojovací šroub.



Obrázek 2.1 - Schůdky

Zdroj: vlastní

Velikost a vlastnosti	
Délka v ose X	944,71 mm
Délka v ose Y	440 mm
Délka v ose Z	564,23 mm
Objem	2,3042e+006 mm ³
Váha	6,2215 kg

Tabulka 2.1 - Rozměry sestavy

2.1.1 Noha

První část je noha obdélníkového průřezu o rozměrech 30x20x2 mm (viz obr. 2.2). Pro schůdky jsou potřeba vždy čtyři nohy stejné délky. Délka nohy závisí na počtu schůdků, kde minimální počet je jeden schod a maximální čtyři schody. V tabulce 2.2 jsou uvedeny délky nohy vzhledem k počtu schodů.

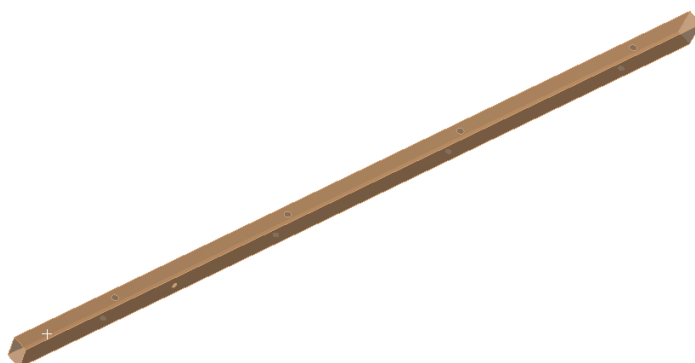
Počet schodů	Délka (mm)
1	250
2	500
3	750
4	1 000

Tabulka 2.2 - Délka nohy



Obrázek 2.2 - Profil

Zdroj: <https://www.ehlinik.cz>



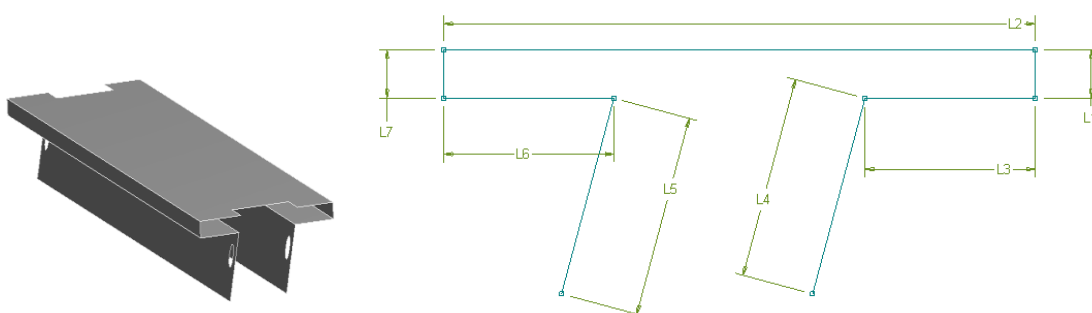
Obrázek 2.3 - Noha schůdků

Zdroj: vlastní

V noze jsou vyvrtány díry o průměru 9 mm pro upevnění schodu. Pro každý schod jsou potřeba dvě díry na každé noze. Navíc v každé noze je vždy jedna díra 220 mm od spodní hrany, která slouží pro připevnění popruhu proti rozjetí schůdků.

2.1.2 Schod

Druhá část je samotný schod, který je vyroben z hliníkového plechu tloušťky 2,5 mm. Pro testování jsem vytvořil schody dvou různých tvarů. Schod s pracovní plochou šířky 73 mm a nosností 120 kg (viz obr. 2.4). Schod s pracovní plochou šířky 31 mm a nosností 150 kg (viz obr. 2.5). V každém schodu jsou vyvrtány čtyři díry průměru 9 mm pro připevnění k nohám. Délka obou schodů je 440 mm.

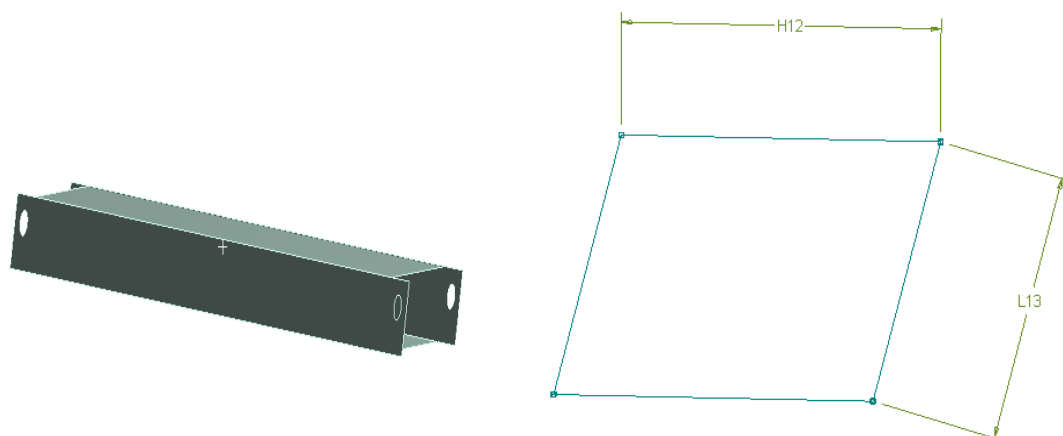


Obrázek 2.4 - Schod do 120 kg

Zdroj: vlastní

Kóta	Velikost (mm)
L1	6
L2	73
L3	21
L4	25
L5	25
L6	21
L7	6

Tabulka 2.3 - Rozměry schodu do 120 kg



Obrázek 2.5 - Schod do 150 kg

Zdroj: vlastní

Kóta	Velikost (mm)
H12	31
L13	25

Tabulka 2.4 - Rozměry schodu do 150 kg

2.1.3 Spojovací materiál

Pro spojení nohou a schodů je potřeba spojovací materiál dle velikosti žebříku. Na každý schod je potřeba použít 2 šrouby M8x50 a 2 matice, pro spojení schodu s nohou. Pro spojení nohou navíc 2 panty a 2 kusy látkových popruhů pro zamezení rozjetí žebříku (viz obr. 2.6).



Obrázek 2.6 - Popruh

Zdroj: <http://www.vazaci-technika.cz>

V rámci analýzy je spojovací materiál řešen jen jako okrajové podmínky.

2.2 Materiál

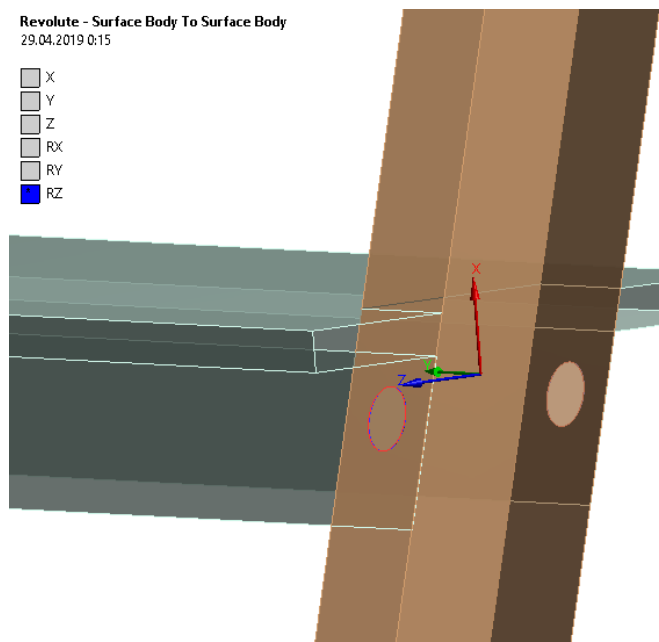
Materiál pro schůdky jsem zvolil hliník a jeho slitiny na základě normy EN 573-3. Nohy jsou vyrobeny ze slitiny EN AW 6060, která je vhodná pro svou velmi dobrou svařovatelnost, s mezí pevnosti $R_m = 195 \text{ MPa}$. Schody z hliníku EN AW 1050, s mezí pevnosti $R_m = 140 \text{ MPa}$. Vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.5.

Veličiny	Hodnoty
Hustota	$2\,700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Modul pružnosti v tahu	$70\,000 \text{ MPa}$
Poissonovo číslo	0,33

Tabulka 2.5 - Vlastnosti hliníku

2.3 Vazby a okrajové podmínky

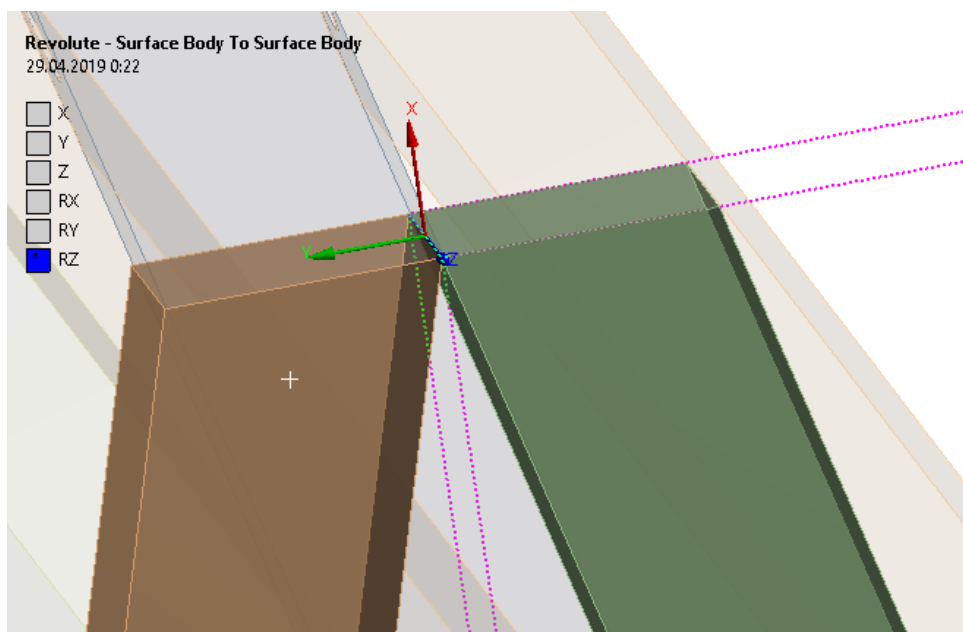
Spojení schodu a nohy je provedeno šroubem a maticí v Ansysu je toto nahrazeno pomocí jointu. V tomto provedení má jediný stupeň volnosti, a to rotace v ose Z (RZ) (viz obr. 2.7).



Obrázek 2.7 - Spojení schodu a nohy

Zdroj: vlastní


Nohy jsou spojené pomocí pantů, tento spoj jsem nahradil také pomocí jointu s jedním stupněm volnosti v ose Z (RZ) (viz obr. 2.8).

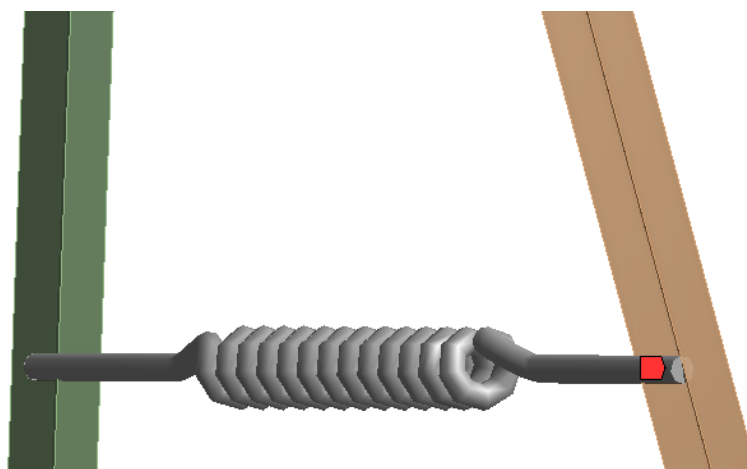


Obrázek 2.8 - Spojení dvou nohou

Zdroj: vlastní

Proti rozjetí nohou se používají popruhy, které jsem v simulaci nahradil pružinou (viz obr. 2.9). V literatuře se maximální pevnost popruhu v tahu uvádí 15 000 N.

Longitudinal - Surface Body To Surface Body
29.04.2019 0:36
 Longitudinal - Surface Body To Surface Body



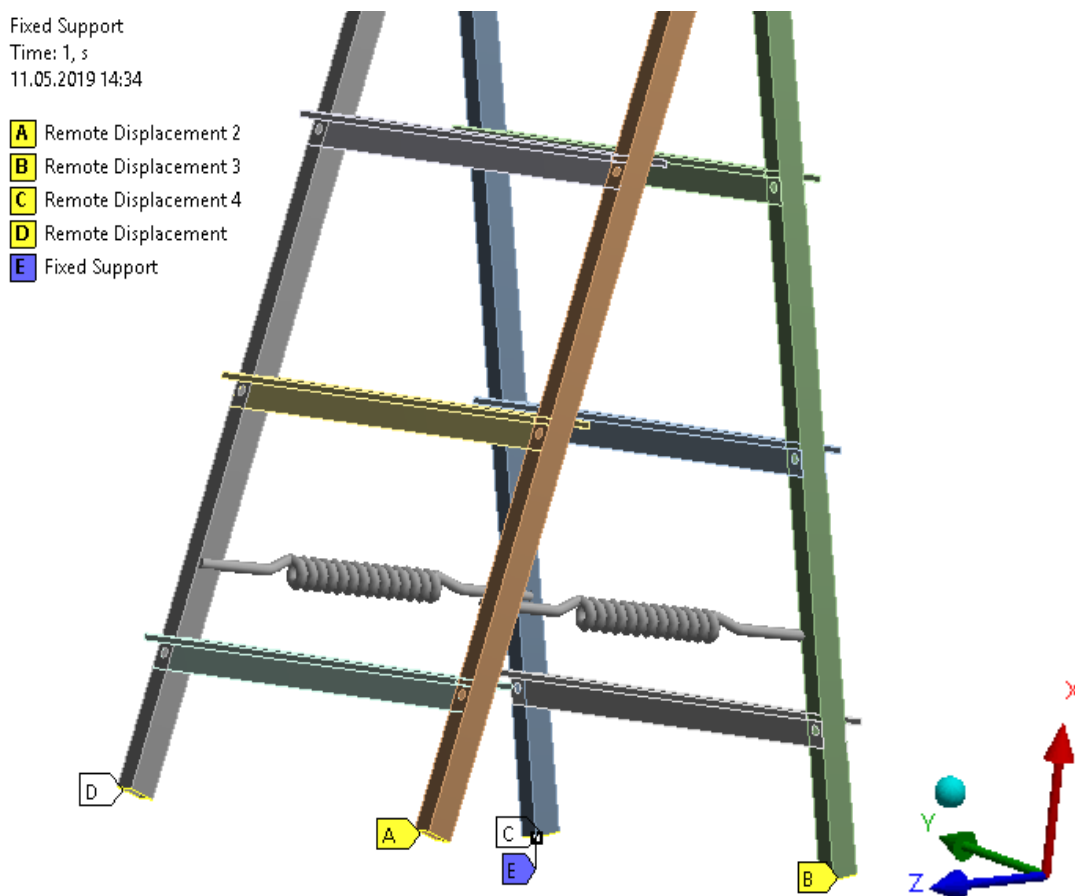
Obrázek 2.9 - Pružina

Zdroj: vlastní

Definice pružiny	
Tuhost pružiny	15 000 N/mm
Tlumení	0 N·s/mm
Předpětí	0
Délka pružiny	435,37 mm

Tabulka 2.6 - Definice pružiny

Protože se jedná o statickou analýzu, musel jsem schůdky zachytit jako celek. Toto jsem provedl zachycením jednoho bodu E na noze. Zbytek nohou jsem uchytil pomocí funkce remote displacement na hranách nohou, pomocí které jsem zamezil posuv v ose X (viz obr. 2.10).



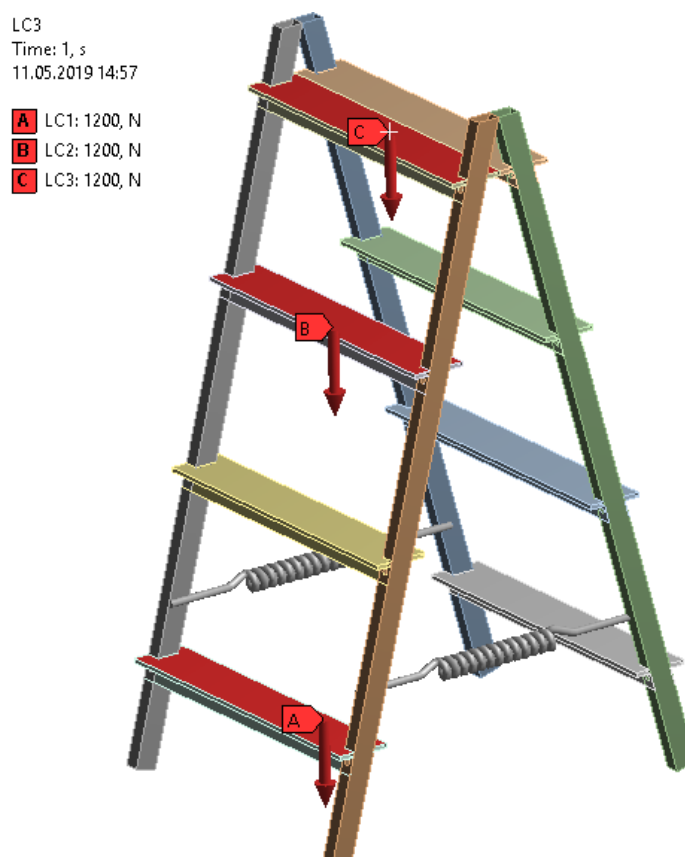
Obrázek 2.10 - Uchycení schůdků

Zdroj: vlastní

2.4 Zatížení

Jako kritická zatížení jsem zvolil maximální dovolenou hmotnost na jednotlivých schodech. Sestavu jsem zatížil třemi zatěžovacími stavy. Tyto stavy jsem označil jako LC1, LC2, LC3 (viz obr. 2.11). Hodnota zatěžovací síly je vypočtena z maximální dovolené hmotnosti. (viz rovnice 1.1). Pro výpočet jsem hodnotu zaokrouhlil na 1 200 N.

$$F = m * g = 120 * 9,81 = 1\,177,2\,N \quad (1.1)$$



Obrázek 2.11 - Zatěžovací stavy

Zdroj: vlastní

Typ	Síla
Složka X	-1 200 N
Složka Y	0 N
Složka Z	0 N

Tabulka 2.7 - Složky napětí

2.5 Mesh

Proběhl s automatickým nastavením s použitím konvergence na redukovaném napětí.

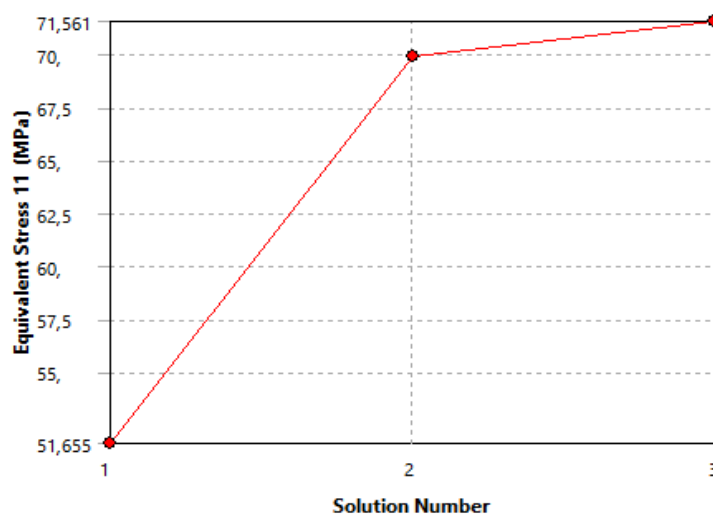
Mesh před konverencí:

Vlastnosti	
Uspořádání	Automatické
Velikost Elementu	14,72 mm
Statistika	
Uzly	16 009
Elementy	15 145

Tabulka 2.8 - Vlastnosti meshe

2.5.1 Konvergence

Funkci konvergence jsem v tomto projektu přiřadil k redukovanému napětí. Jako maximální požadovanou změnu jsem nastavil hodnotu 5 % (viz obr. 2.12).



	Equivalent Stress 11 (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	51,655		16009	15145
2	69,93	30,06	26024	24969
3	71,561	2,3061	46115	44876

Obrázek 2.12 - Konvergence

Zdroj: vlastní

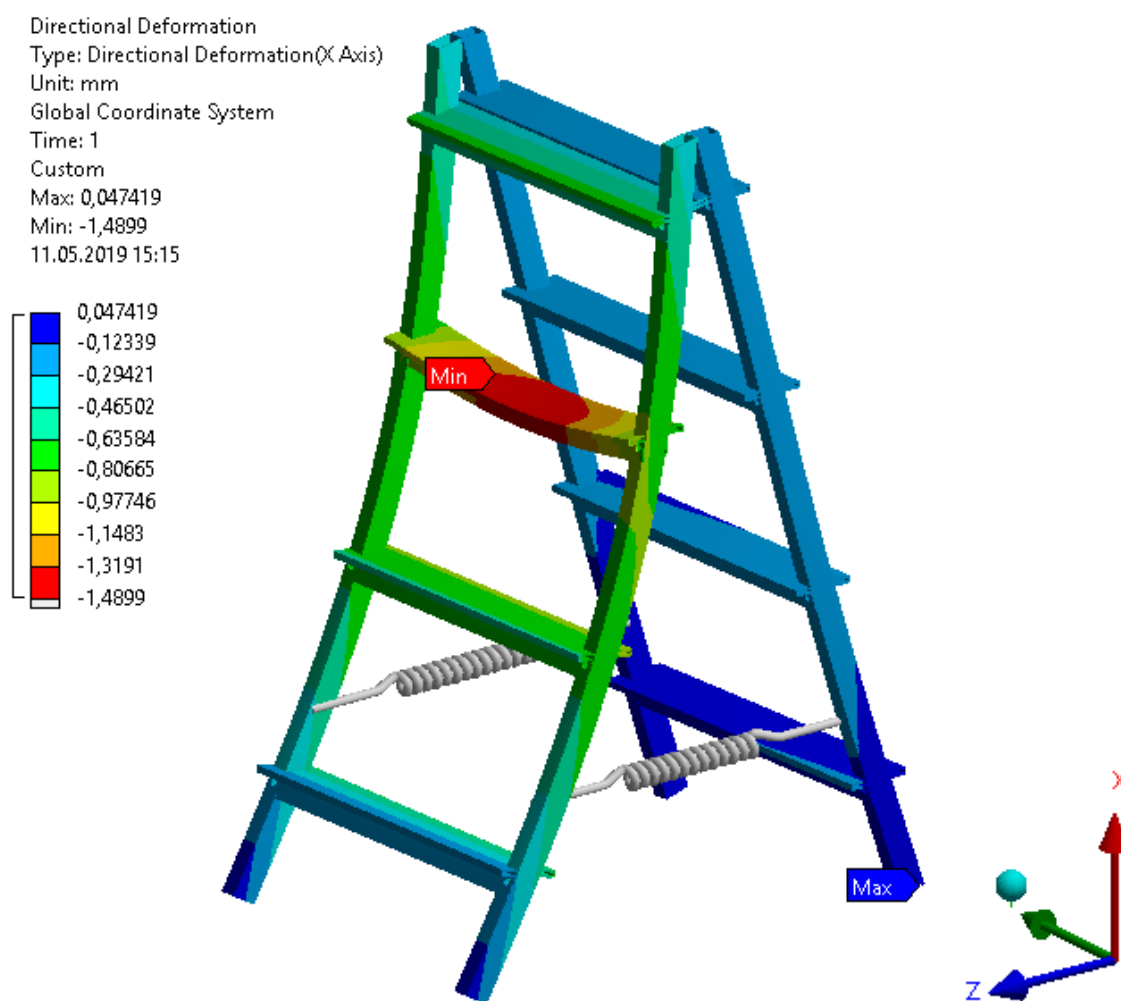
Po konvergenci se počet uzlů a elementů z trojnásobil a díky tomu jsem dosáhl přesnějších výsledků.

2.6 Výsledky

V této kapitole se podíváme na výsledky posuvů a napětí sestavy a reakce v pružinách.

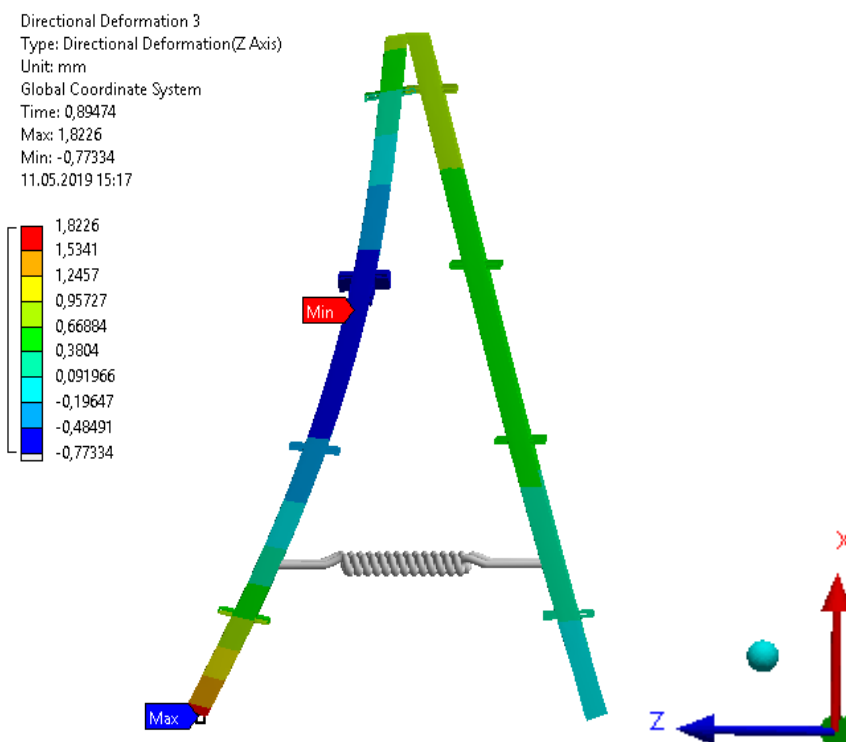
2.6.1 Posuvy

Největší posuvy jsou při zatížení LC2. Posuvy jsou největší, protože dochází k větším průhybům uprostřed nohy. Posuvy v ose Y jsou proti posuvům v osách X a Z zanedbatelné.



Obrázek 2.13 - Posuvy v ose X

Zdroj: vlastní



Obrázek 2.14 - Posuvy v ose Z

Zdroj: vlastní

	Posuv v ose X	Posuv v ose Y	Posuv v ose Z	Celkový posuv
LC1				
Minimum	-1,034 mm	-3,664e-004 mm	-0,20372 mm	0 mm
Maximum	2,0406e-002 mm	0,28465 mm	1,2117 mm	1,2331 mm
Průměr	-0,259 mm	0,12238 mm	0,27094 mm	0,47437 mm
LC2				
Minimum	-1,4899 mm	-8,228e-005 mm	-0,77334 mm	0 mm
Maximum	4,7419e-002 mm	0,19923 mm	1,8226 mm	1,8399 mm
Průměr	-0,56719 mm	0,10498 mm	8,1877e-002 mm	0,86828 mm
LC3				
Minimum	-1,1317 mm	-7,949e-005 mm	-0,29269 mm	0 mm
Maximum	5,1588e-002 mm	0,20917 mm	1,3312 mm	1,3458 mm
Průměr	-0,32527 mm	0,12176 mm	0,26302 mm	0,54809 mm

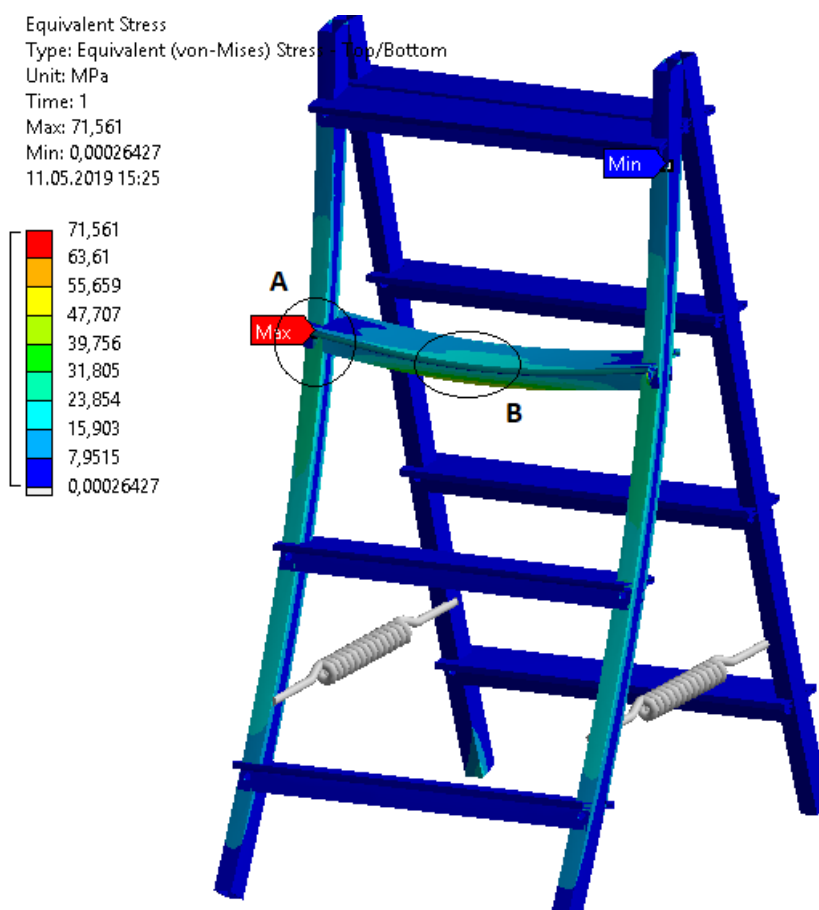
Tabulka 2.9 - Výsledky posuvů sestavy

2.6.2 Napětí

Maximální hodnoty redukovaného napětí jsou ve všech zatíženích v podstatě totožné. Největší průměrné zatížení je také při zatěžovacím stavu LC2 (viz obr. 2.15, 2.16 a 2.17).

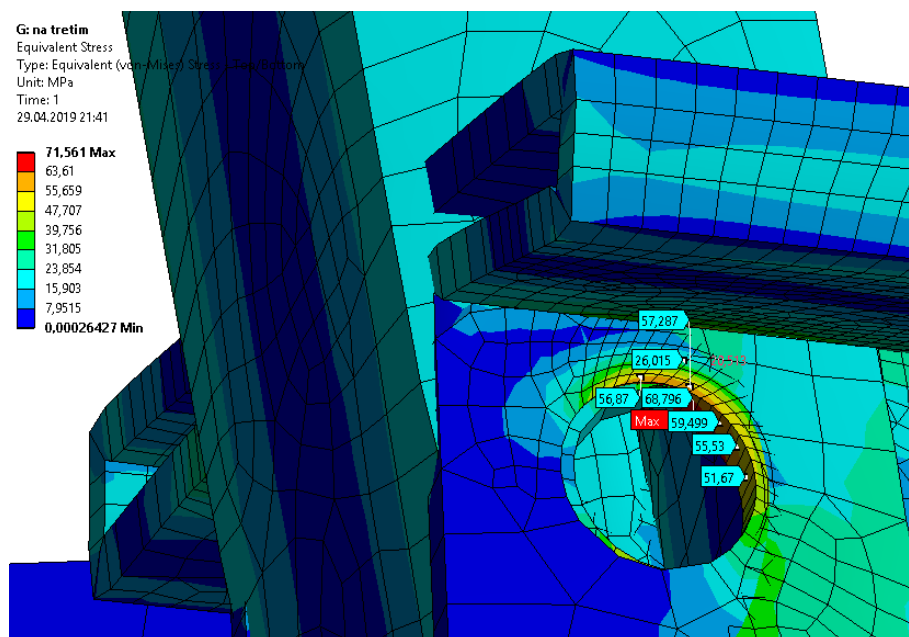
	LC1	LC2	LC3
Maximum	73,4 MPa	71,561 MPa	71,313 MPa
Průměrné napětí	3,3986 MPa	5,814 MPa	4,0079 MPa

Tabulka 2.10 - Redukované napětí sestavy



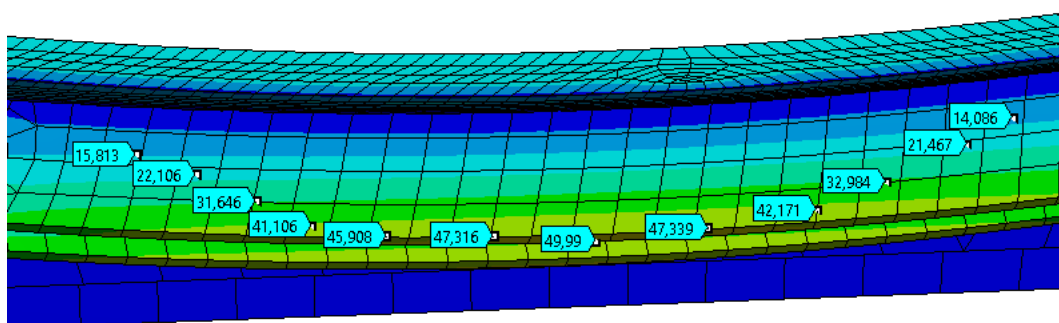
Obrázek 2.15 - Redukované napětí sestavy

Zdroj: vlastní



Obrázek 2.16 - Redukované napětí detail A

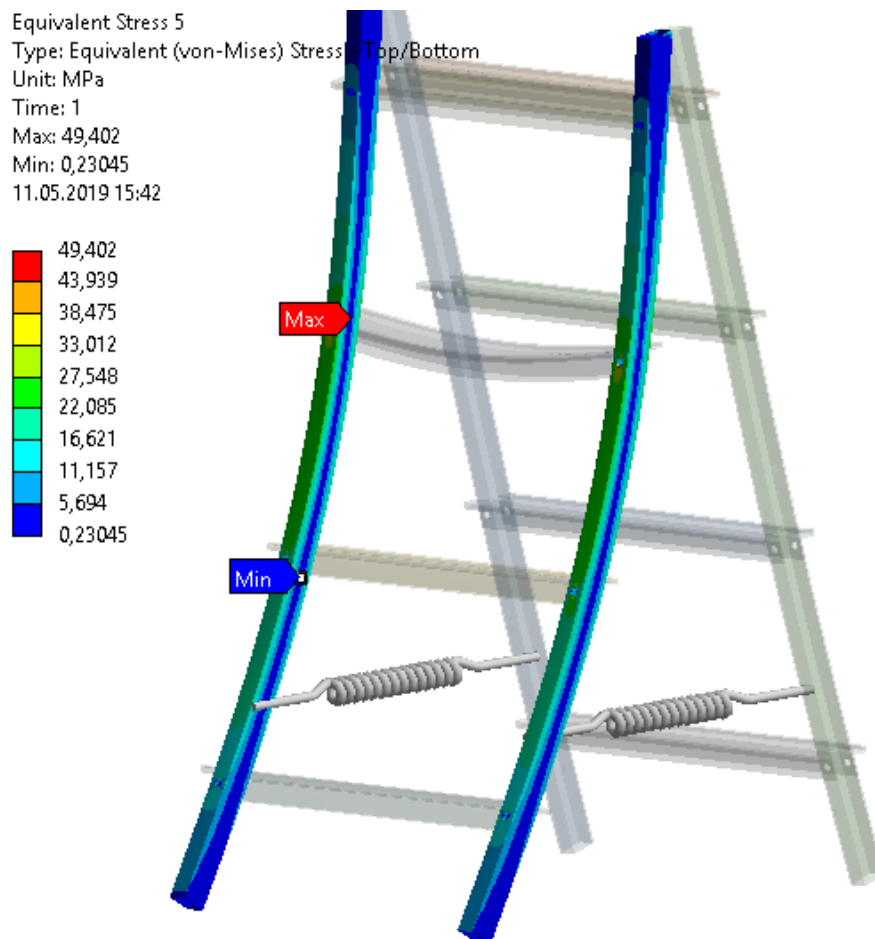
Zdroj: vlastní



Obrázek 2.17 - Redukované napětí detail B

Zdroj: vlastní

Napětí na nohou je v porovnání se schody značně menší, největší zatížení je také ve spoji. Na spoj se podívám podrobněji v submodelingu.



Obrázek 2.18 - Redukované napětí na nohou

Zdroj: vlastní

2.6.3 Reakce

V pružině dochází k největší reakci při zatížení na horním schodu.

Jméno objektu	Pružina 1	Pružina 2
Typ	Sonda pružiny	
Síla	93,065 N	96,606 N
Prodloužení	6,2043e-003 mm	6,4404e-003 mm

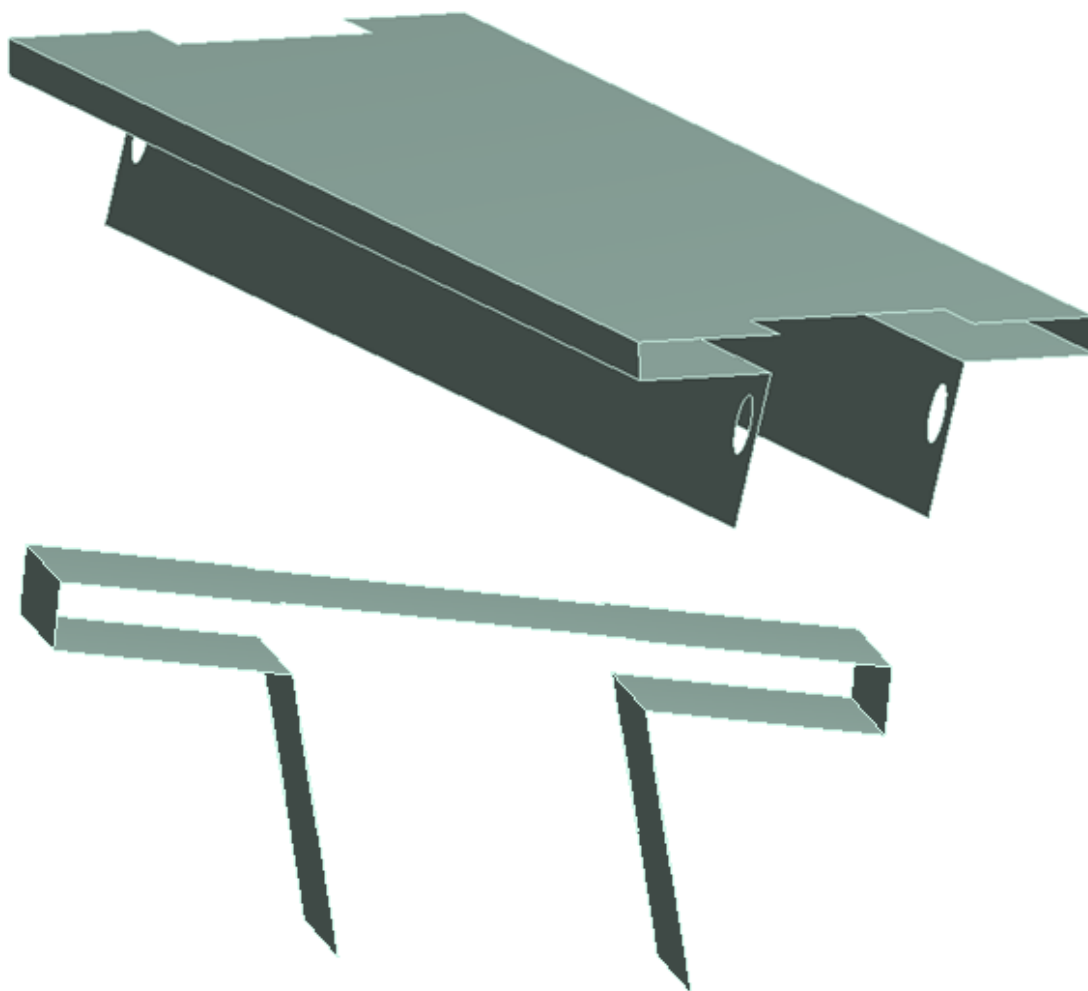
Tabulka 2.11 - Reakce v pružinách

3 Modelování a analýza komponent

Na základě výsledků sestavy se v této kapitole podívám na jednotlivé schody. Z vypočtené sestavy vezmu výsledek reakcí ve spoji a použiji je jako okrajovou podmínku.

3.1 Schod do 120 kg

Specifikaci tématu schodu jsem blíže vysvětlil v kapitole 2.1.2., kde jsem popsal jak rozměry, tak maximální zatížení či tvar.

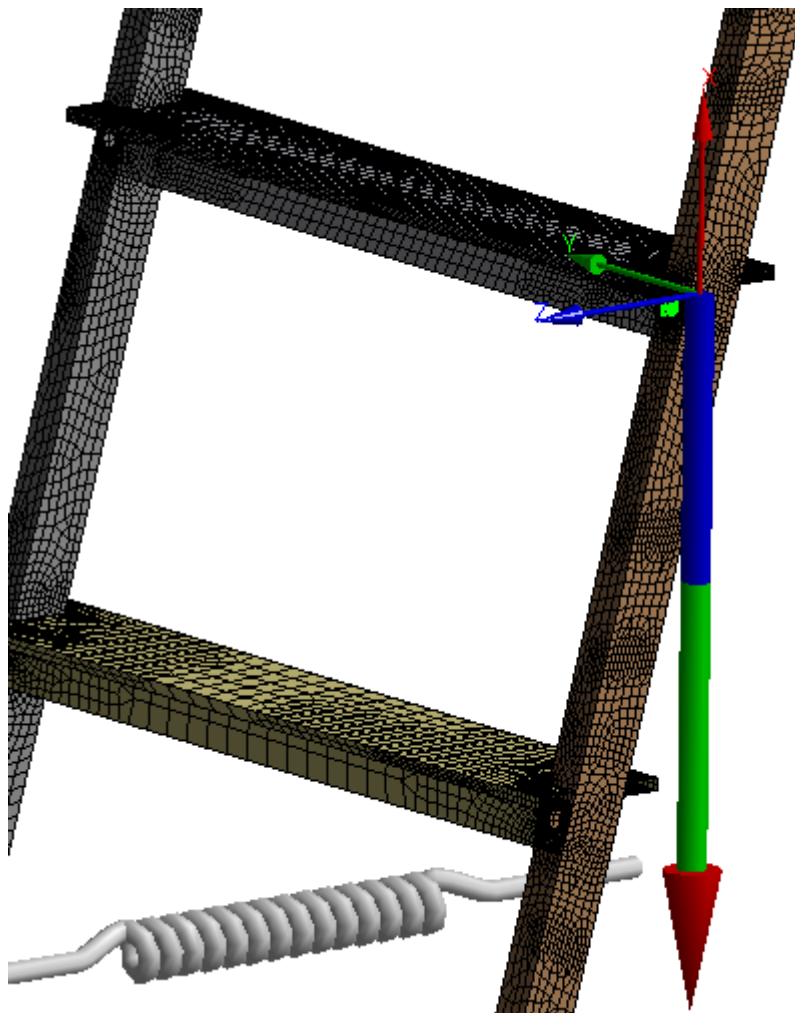


Obrázek 3.1 - Tvar schodu do 120 kg

Zdroj: vlastní

3.1.1 Okrajové podmínky

Reakce v jointech na sestavě byly v testovaných zatěžovacích stavech totožné (viz obr. 3.2). Hodnoty této reakce použiji jako okrajovou podmínku při testování schodu.



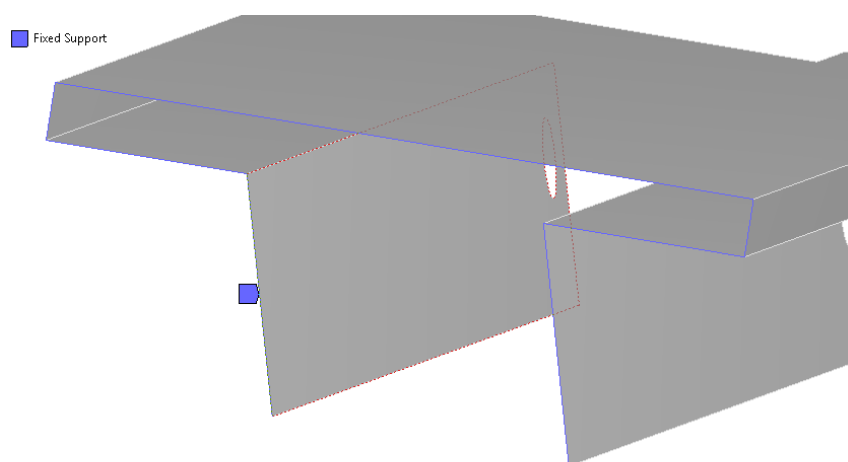
Obrázek 3.2 - Reakce v sestavě

Zdroj: vlastní

Výsledek	Síla v jointu 1	Síla v jointu 2
Osa X	-600,04 N	-600,03 N
Osa Y	-7,1803 N	7,1271 N
Osa Z	1,2633 N	0,92017 N
Celkový	600,08 N	600,08 N

Tabulka 3.1 - Reakce v sestavě

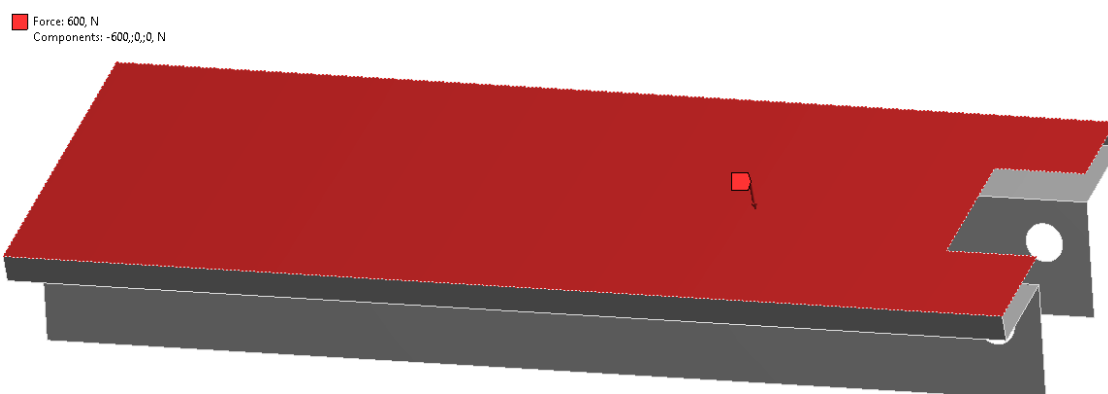
Pro uchycení jsem schod rozpůlil a vetknul (viz obr. 3.3).



Obrázek 3.3 - Vetknutí

Zdroj: vlastní

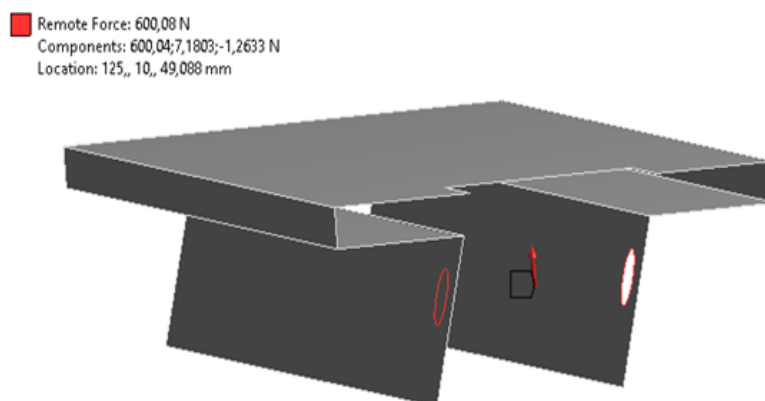
Dále jsem schod zatížil odpovídající silou (viz obr. 3.4).



Obrázek 3.4 - Působící síla

Zdroj: vlastní

A na konec jsem do těžiště otvorů vložil získané hodnoty reakce (viz obr. 3.5).



Obrázek 3.5 - Reakční síla

Zdroj: vlastní

Typ	Síla v jointu 1
Složka X	600,04 N
Složka Y	7,1803 N
Složka Z	-1,2633 N

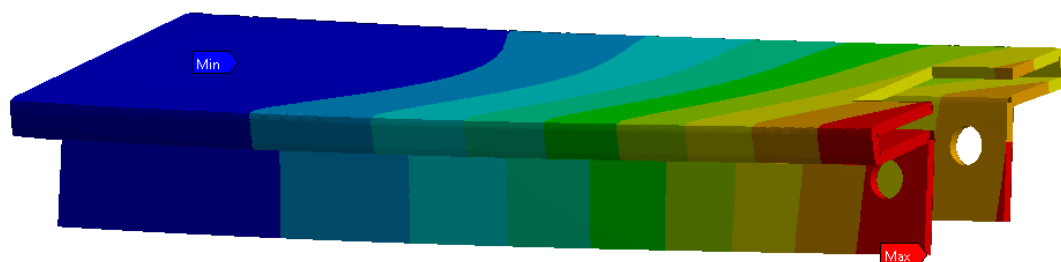
Tabulka 3.2 - Složky síly

3.1.2 Výsledky posuvů

Maximální posuv v ose X je 0,7 mm dochází k plynulé deformaci zatížením, kde největší posuv je ve středu schodu (viz obr. 3.6). V ose Y a Z jsou posuvy minimální.

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Custom Obsolete
11.05.2019 20:18

0,69399
0,6147
0,53541
0,45612
0,37683
0,29754
0,21826
0,13897
0,059679
-0,019609



Obrázek 3.6 - Posuvy v ose X

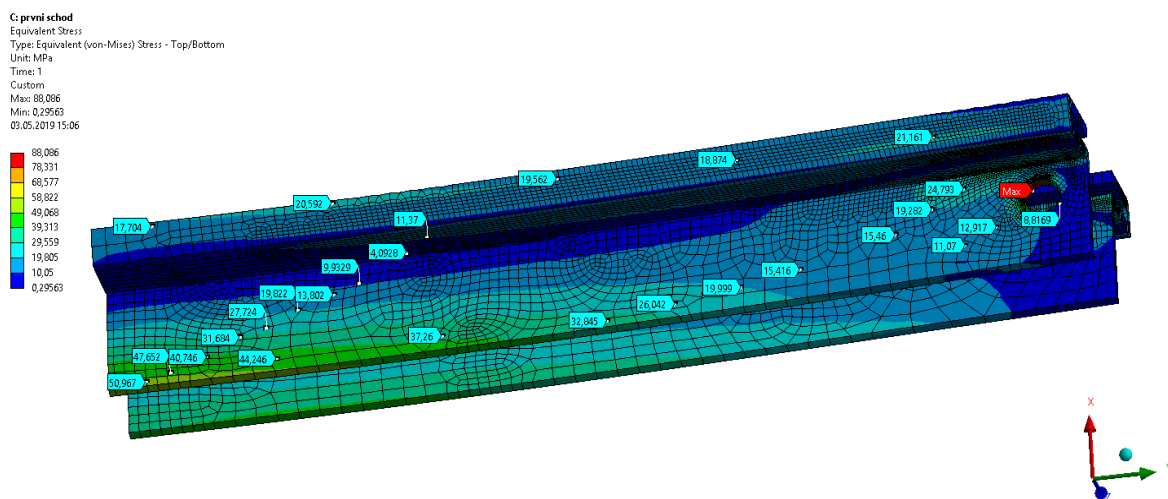
Zdroj: vlastní

	Posuv v ose X	Posuv v ose Y	Posuv v ose Z	Celkový posuv
Minimum	-1,961e-002 mm	-3,880e-002 mm	-0,12678 mm	0 mm
Maximum	0,69398 mm	0,10201 mm	1,423e-002 mm	0,70947 mm
Průměr	0,31493 mm	-2,866e-003 mm	-2,777e-002 mm	0,31749 mm

Tabulka 3.3 - Výsledky posuvů

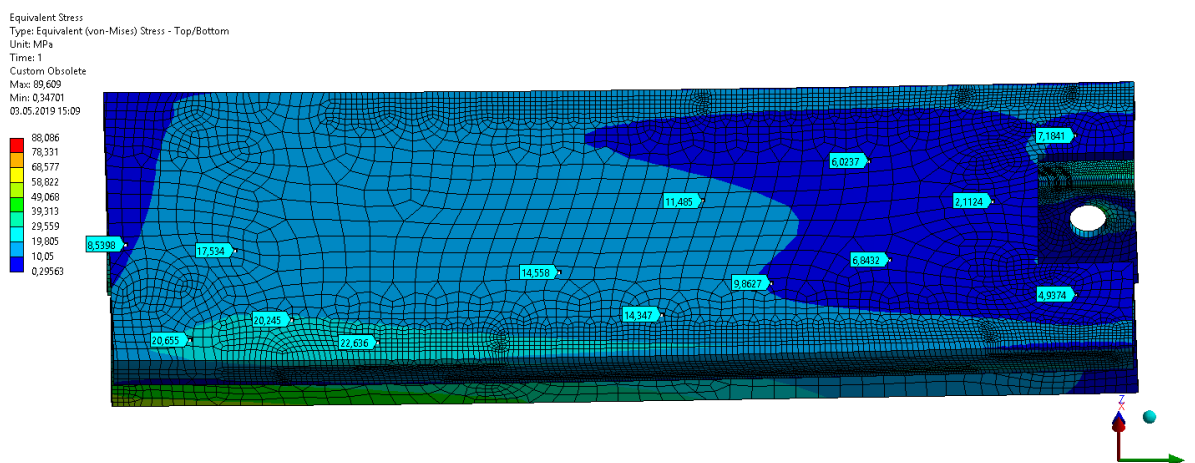
3.1.3 Výsledky napětí

Obrázky 3.7 a 3.8 zobrazují napětí schodu na boku a na horní straně. Největší napětí máme v otvoru pro připevnění k noze (viz obr. 3.9), na tento výsledek se zaměříme ještě v submodelingu.



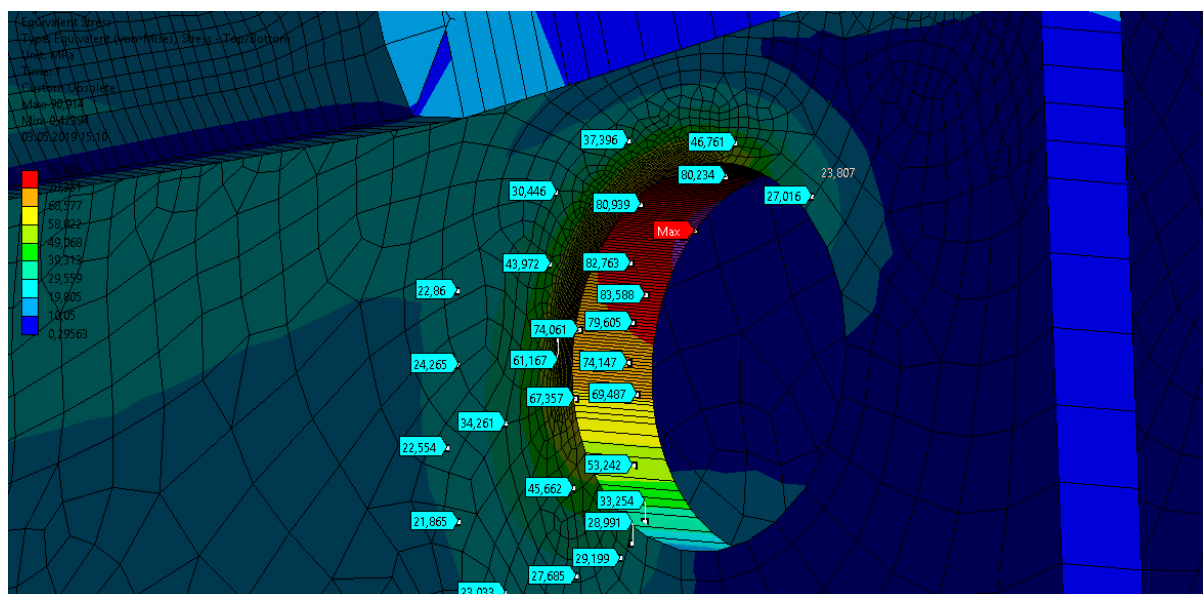
Obrázek 3.7 - Napětí na boku schodu

Zdroj: vlastní



Obrázek 3.8 - Napětí na horní straně schodu

Zdroj: vlastní

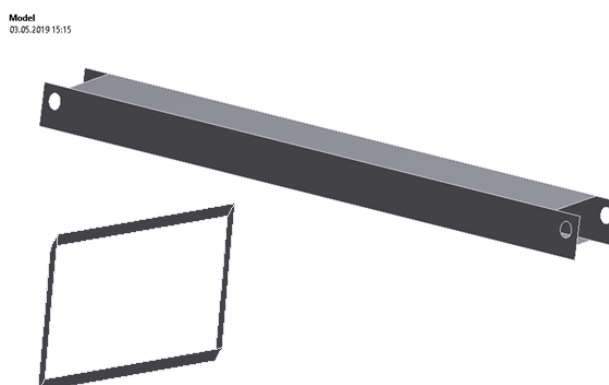


Obrázek 3.9 - Napětí v otvoru pro připevnění

Zdroj: vlastní

3.2 Schod do 150 kg

Protože se jedná tvarově o jiný schod než schod do 120 kg a navíc je zatížen jinou silou, bylo potřeba pro získání správné reakční síly, vytvořit analýzu sestavy i s tímto schodem. Tuto sestavu jsem vymodeloval stejně jako přechozí. Vazby a okrajové podmínky jsou totožné jako u první sestavy, viz kapitola 2.3. Zatížení je ve stejných místech jako LC1, LC2, LC3 s rozdílem ve velikosti síly, ta v tomto případě je větší, a to $F = 1\,500\text{ N}$. Výsledky této sestavy jsou velmi podobné první sestavě. Popis samotného schodu jsem již vytvořil v kapitole 2.1.2.

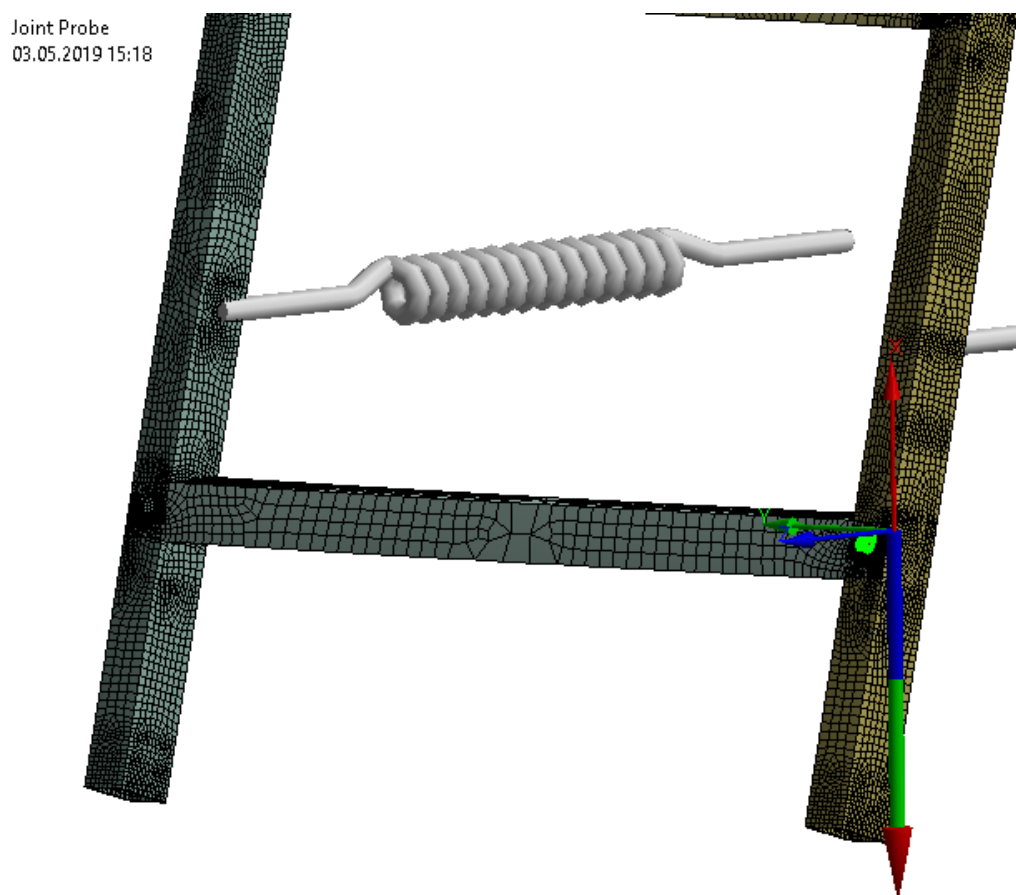


Obrázek 3.10 - Tvar schodu do 150 kg

Zdroj: vlastní

3.2.1 Okrajové podmínky

Reakce v zatížené sestavě (viz obr. 3.11).



Obrázek 3.11 - Reakce v sestavě

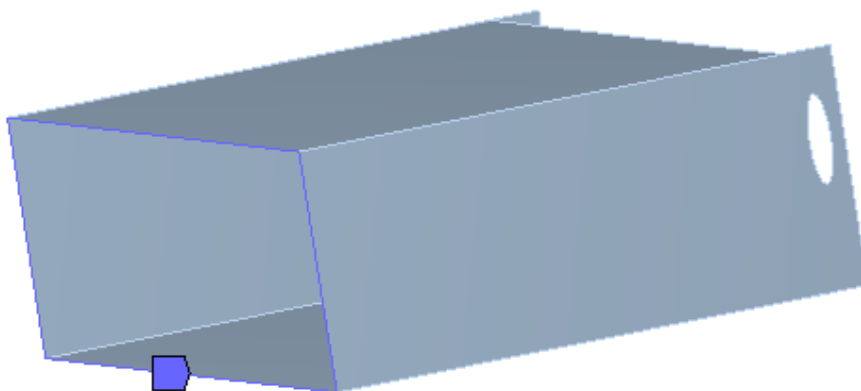
Zdroj: vlastní

Výsledek	Síla v jointu 1	Síla v jointu 2
Osa X	-749,96 N	-749,96 N
Osa Y	8,3973 N	-8,401 N
Osa Z	-3,3383 N	-2,9699 N
Celkový	750,01 N	750,01 N

Tabulka 3.4 - Reakce v sestavě

Použil jsem stejný postup pro testování jako u předchozího schodu. Schod jsem v místě řezu vetknul (viz obr. 3.12) a zatížil odpovídající silou (viz obr. 3.13).

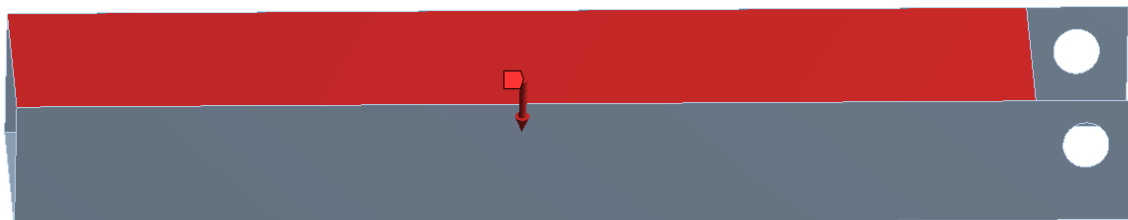
■ Fixed Support



Obrázek 3.12 - Vetknutí

Zdroj: vlastní

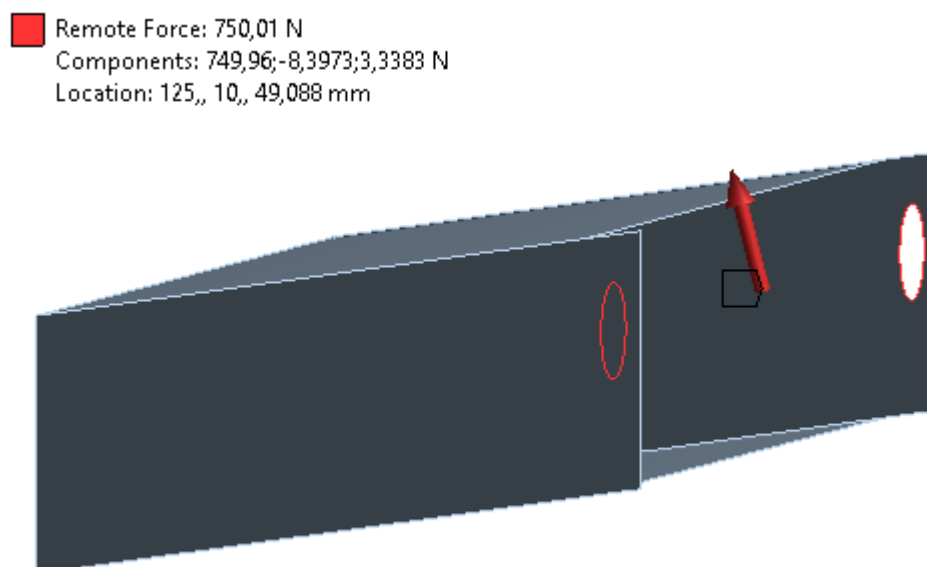
■ Force: 750, N
Components: -750;0;0, N



Obrázek 3.13 - Působící síla

Zdroj: vlastní

Vložení reakce do otvorů (viz obr. 3.14).



Obrázek 3.14 - Reakční síla

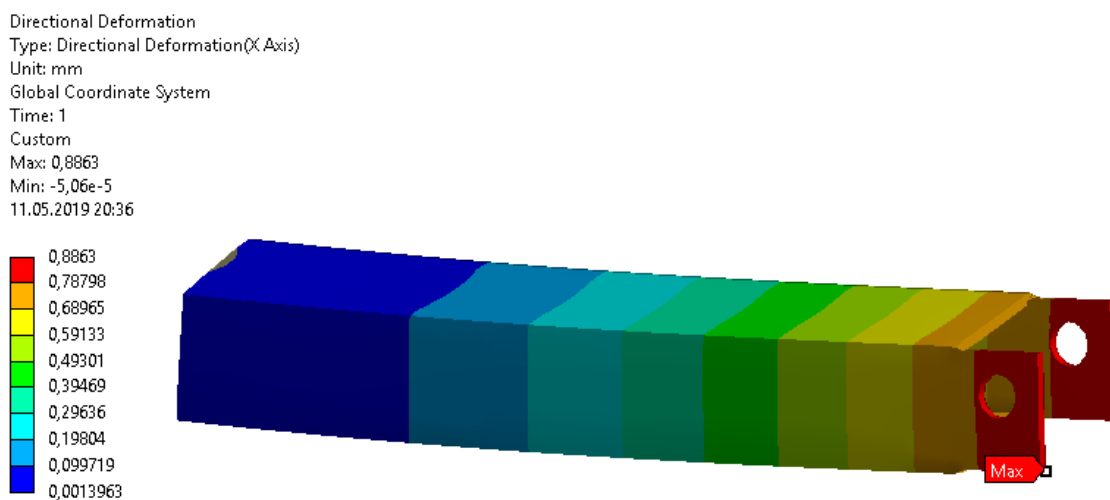
Zdroj: vlastní

Typ	Síla v jointu 1
Složka X	749,96 N
Složka Y	-8,3973 N
Složka Z	3,3383 N

Tabulka 3.5 - Složky síly

3.2.2 Výsledky posuvů

Posuvy v ose X jsou také plynulé s maximálním posuvem 0,89 mm (viz obr. 3.15). Posuvy v ose Y a Z jsou opět zanedbatelné.



Obrázek 3.15 - Posuvy v ose X

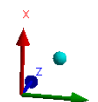
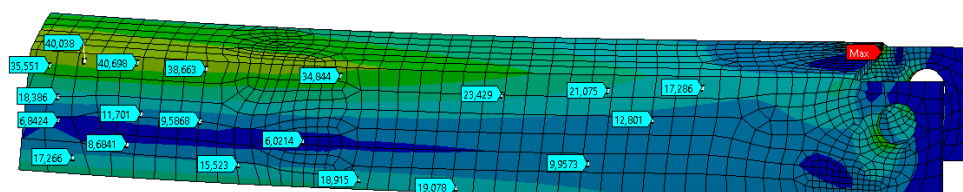
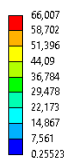
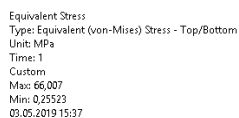
Zdroj: vlastní

	Posuv v ose X	Posuv v ose Y	Posuv v ose Z	Celkový posuv
Minimum	-5,06e-005 mm	-8,983e-002 mm	-0,16126 mm	0 mm
Maximum	0,8863 mm	8,512e-002 mm	1,854e-003 mm	0,90354 mm
Průměr	0,42826 mm	-2,838e-003 mm	-7,335e-002 mm	0,43703 mm

Tabulka 3.6 - Výsledky posuvů

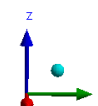
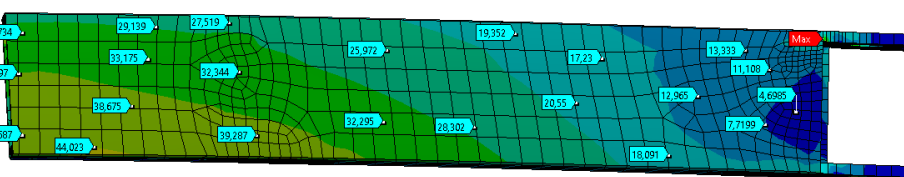
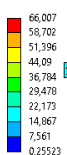
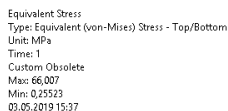
3.2.3 Výsledky napětí

Obrázky 3.16, 3.17 a 3.18 zobrazují napětí schodu na boku, na horní straně a v otvoru pro připevnění k noze.



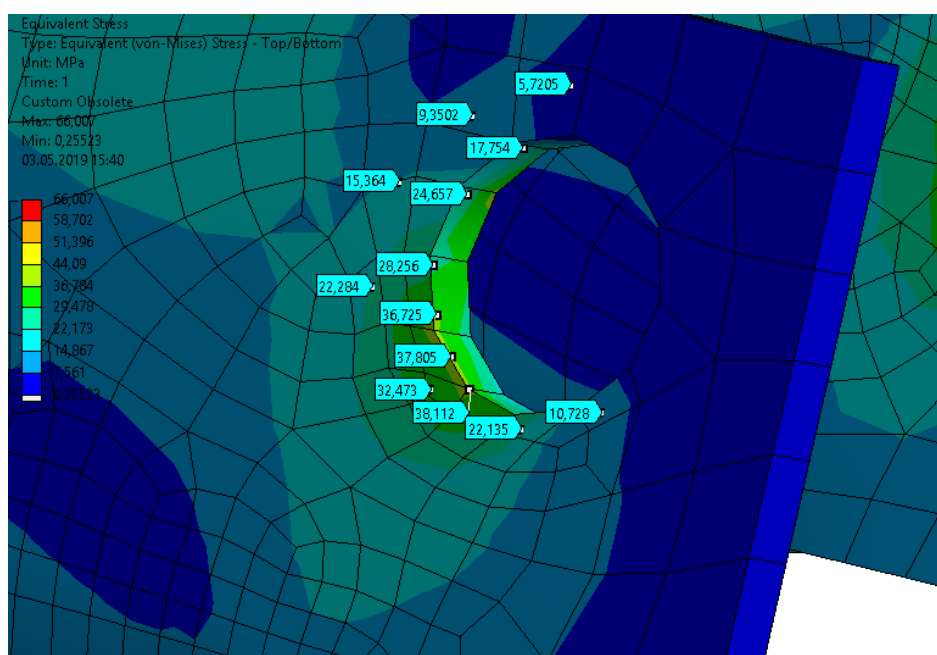
Obrázek 3.16 - Napětí na boku schodu

Zdroj: vlastní



Obrázek 3.17 - Napětí na vrchu schodu

Zdroj: vlastní

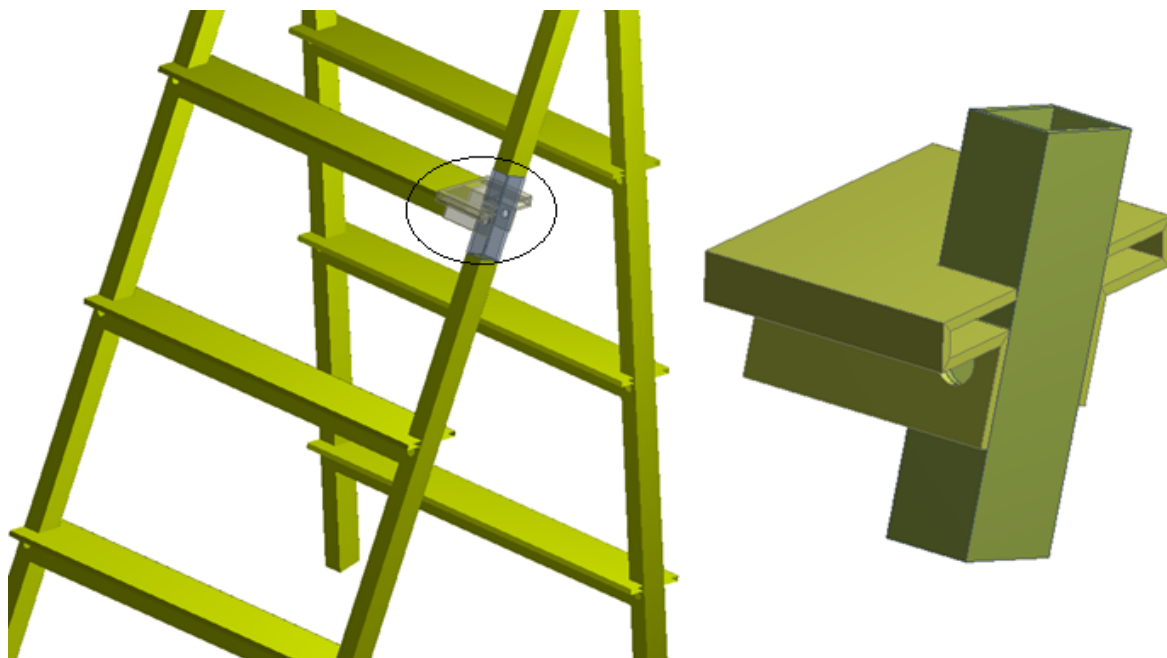


Obrázek 3.18 - Napětí v otvoru pro připevnění

Zdroj: vlastní

4 Řešení detailů a submodeling

Submodeling je metoda, která se používá pro řešení detailů ve velkých modelech, kde musí člověk balancovat mezi přesností a časem výpočtů. V případě studijní verze Ansysu máme jen omezený počet prvků, proto byly předchozí modely vytvořeny jako shell. Submodel spoje jsem vytvořil již jako solid. Pomocí submodelingu jsem vyřešil detail spoje schodu a nohy. Na obrázku 4.1 je znázorněn výřez ze schůdků.

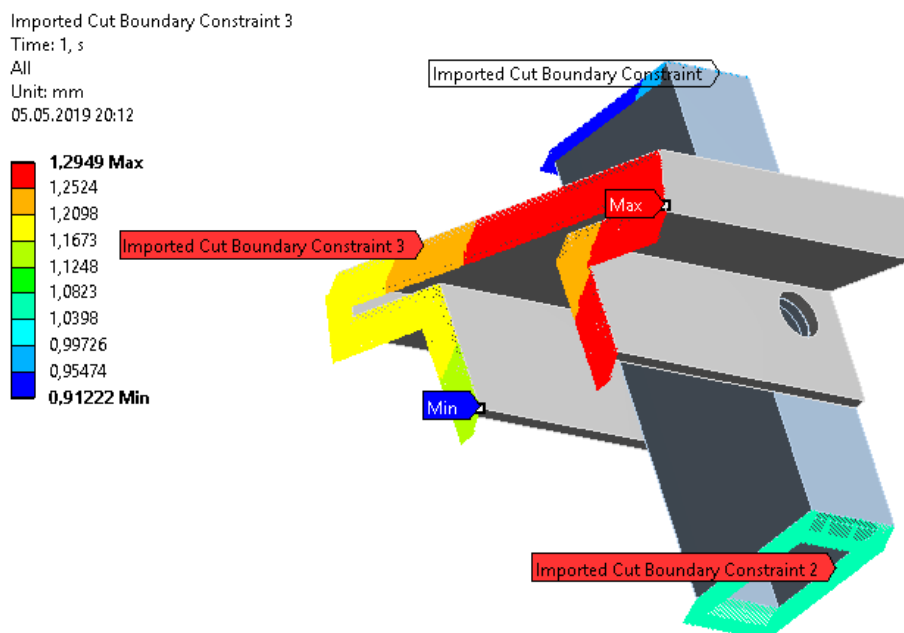


Obrázek 4.1 - Výřez

Zdroj: vlastní

4.1 Vazby a okrajové podmínky

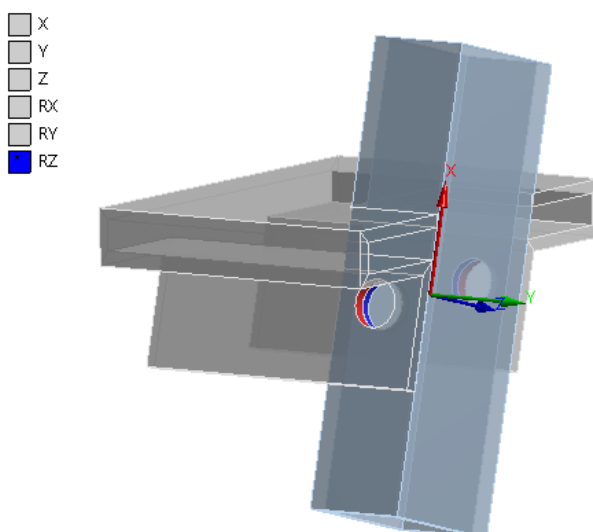
Z výsledků modelu sestavy (kapitola 2.6.1), jsem do míst řezu vložil získané posuvy.



Obrázek 4.2 - Vložené posuvy do vyřezaných míst

Zdroj: vlastní

Spojení schodu s nohou pomocí jointu s možností rotace kolem osy Z (RZ) (viz obr. 4.3).

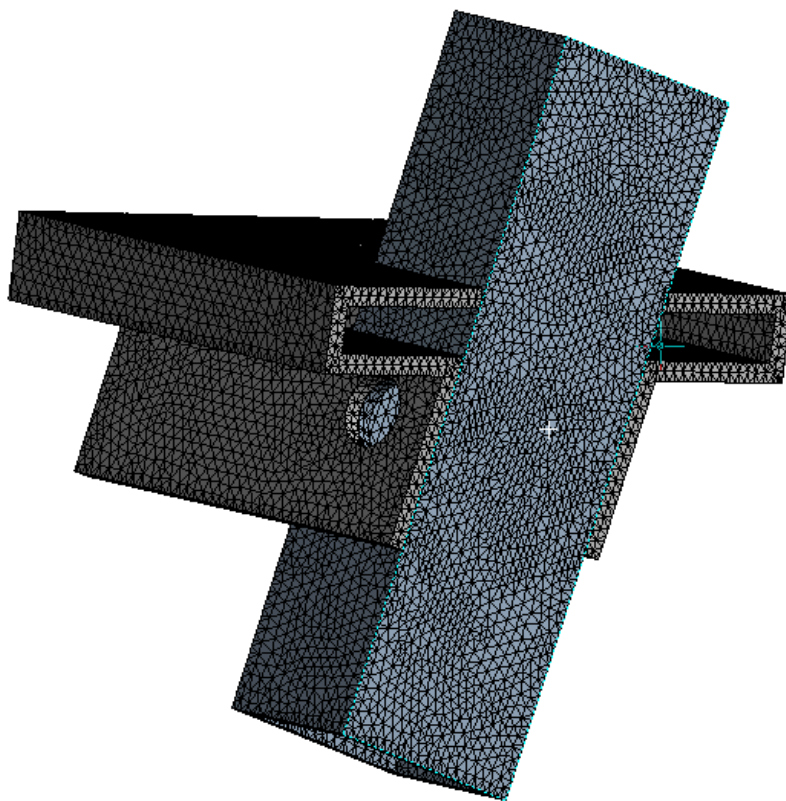


Obrázek 4.3 - Joint

Zdroj: vlastní

4.2 Mesh

Mesh byl díky submodelingu značně zjemněn, způsob byl nastaven defaultně s upravenou velikostí elementu na 0,8 mm.



Obrázek 4.4 - Mesh

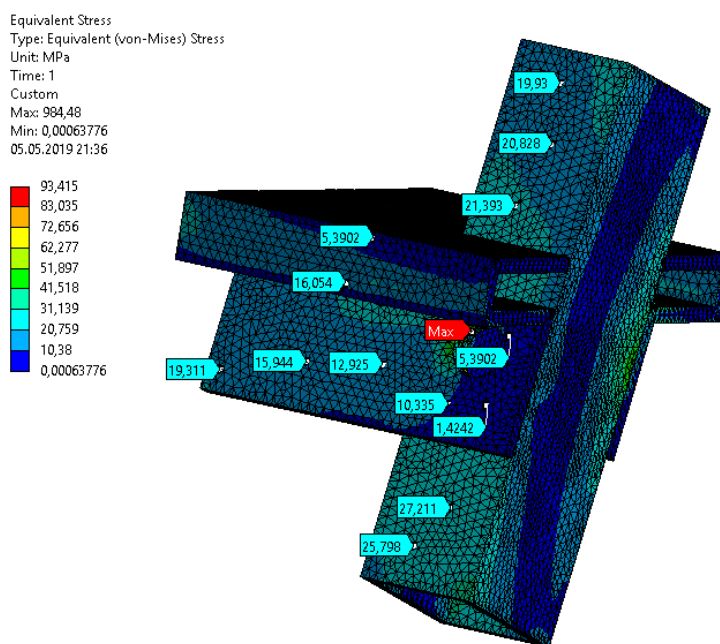
Zdroj: vlastní

Vlastnosti	
Uspořádání	Automatické
Velikost elementu	0,8 mm
Statistika	
Uzly	169 158
Elementy	94 723

Tabulka 4.1 - Mesh

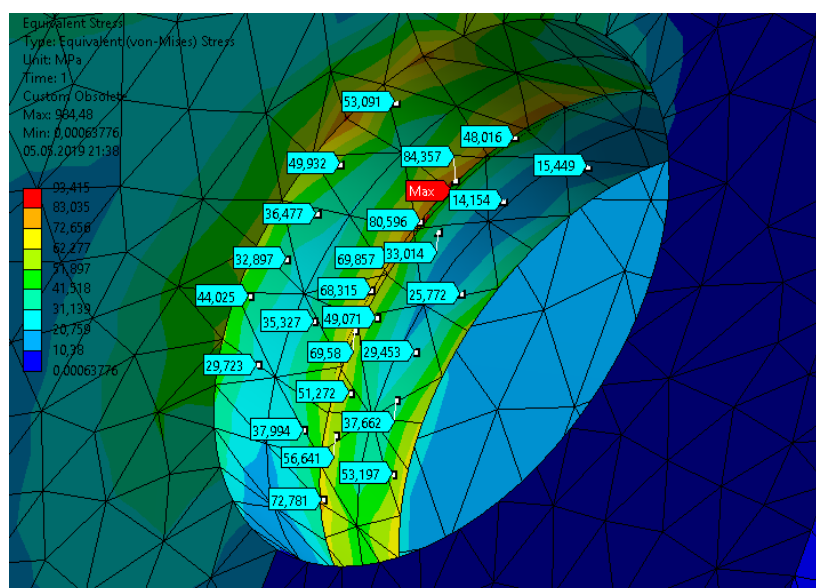
4.3 Výsledky

Na obrázku 4.5 a 4.6 máme výsledky redukovaného napětí jak schodu, tak nohy. Celkové redukované napětí nepřesáhne 94 MPa, napětí je větší na schodu než na noze.



Obrázek 4.5 - Napětí na výřezu

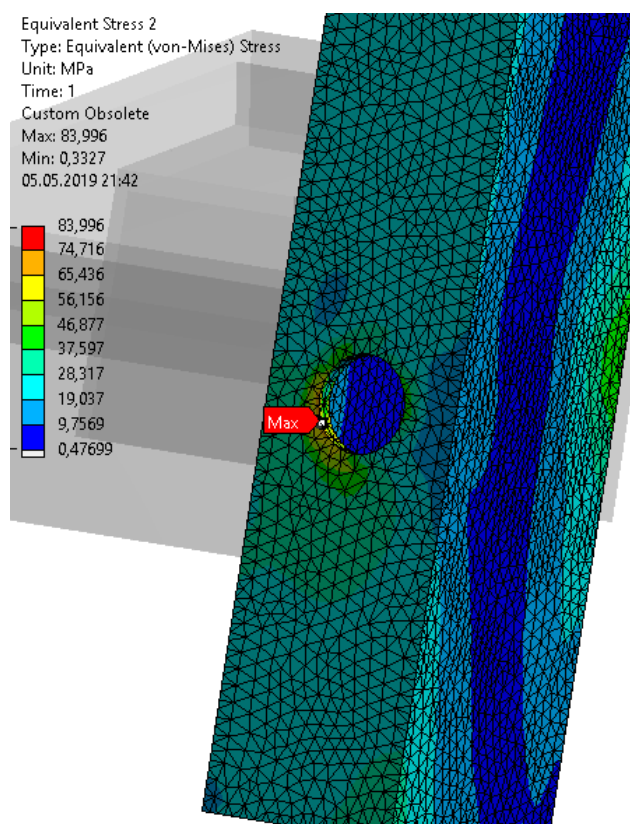
Zdroj: vlastní



Obrázek 4.6 - Napětí na spoji

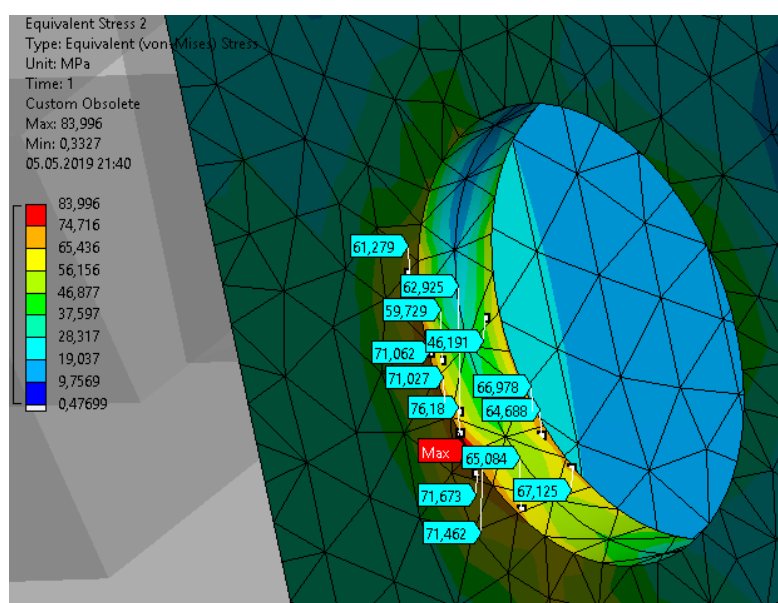
Zdroj: vlastní

Redukované napětí na noze v submodelu nám zobrazuje obrázek 4.7 a 4.8.



Obrázek 4.7 - Napětí na noze

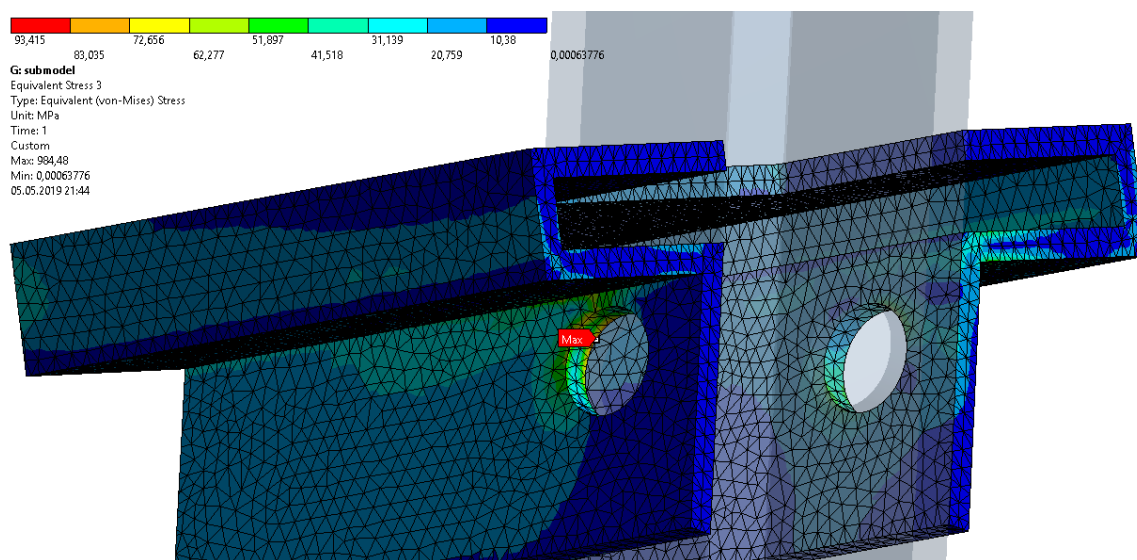
Zdroj: vlastní



Obrázek 4.8 - Napětí na otvoru v noze

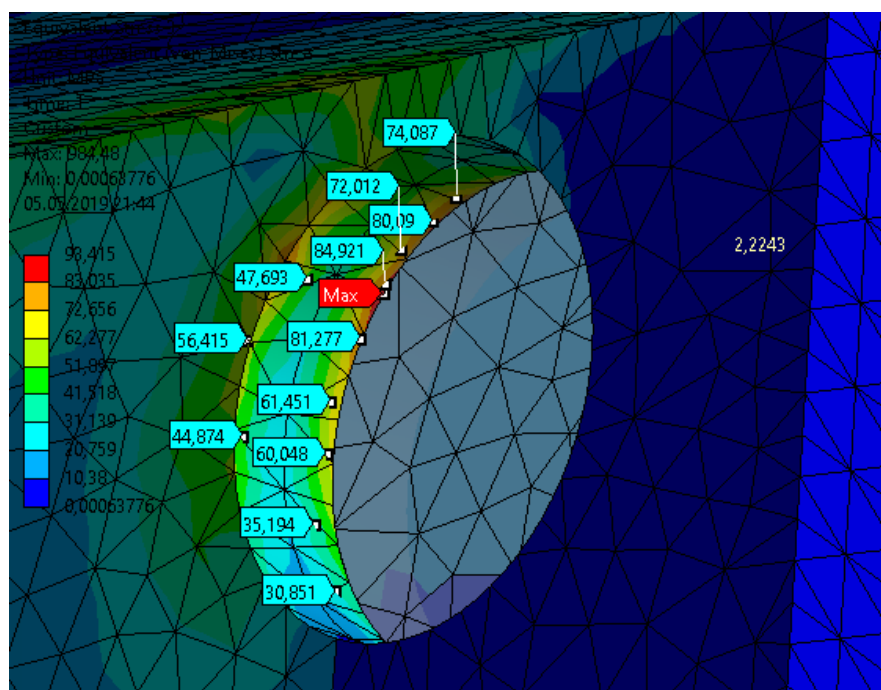
Zdroj: vlastní

Redukované napětí na noze v submodelu je patrné na obrázku 4.9 a taktéž na obrázku 4.10.



Obrázek 4.9 - Napětí na schodu

Zdroj: vlastní



Obrázek 4.10 - Napětí na otvoru ve schodu

Zdroj: vlastní

5 Vyhodnocení

Následující kapitoly se věnují výsledkům mnou vybrané sestavy a zhodnocení obecných postupů analýzy stavebnicových systémů.

5.1 Vyhodnocení schůdků

Sestava a schody byly modelovány jako shell. Během analýzy sestavy jsem zjistil, že k největším napětím dochází během zatížení prostředních schodů, a to kvůli většímu prohnutí nohou. Posuv v ose X dosahuje průhybu 1,49 mm, uprostřed zatíženého schodu je to kombinace průhybu schodu a nohy. Posuv 1,49 mm na žebříku výšky 1 m je zanedbatelný. Posuv v ose Z je největší na spodní hraně nohy, kde dochází k lehkému rozjetí žebříku. Posuv 1,83 mm je také zanedbatelný. Maximální redukované napětí v sestavě se schodem do 120 kg vyšlo 71,561 MPa, které bylo ve spoji pro připevnění nohy ke schodu. V případě, že budeme počítat s maximální dovolenou hmotností vyjde nám součinitel bezpečnosti (1.2). V pružině, která nahrazuje popruhy jsem získal maximální sílu 96,7 N, kde popruh je určen pro maximální sílu 15 000 N.

$$k = \frac{Rm}{\sigma_{red}} = \frac{140}{71,561} = 1,96 \doteq 2 \quad (1.2)$$

V analýze schodu do 120 kg jsem zjistil, že posuvy v ose Y a Z jsou zanedbatelné, maximální posuv v ose X je 0,69 mm. Jedná se o posuv uprostřed schodu, tento posuv je plynulé prohnutí směrem od místa uchycení do středu schodu. Napětí na boku schodu bylo kolem 45 MPa, největší napětí opět vyšlo v otvoru pro uchycení. Schod do 150 kg má posuvy v ose Y a Z zanedbatelné, posuv v ose X je o něco větší, a to 0,89 mm. Opět se jedná o plynulou deformaci z kraje do středu schodu. Díky tvaru schodu je napětí na schodu lepší než v předchozím případě a to 66 MPa.

Submodel spoje jsem vytvořil jako solid, takže výsledky by měly být značně přesnější. Maximální redukované napětí je 84 MPa, z této hodnoty koeficient bezpečnosti (1.3) a na schodu je lokální maximum 94 MPa, která nám dá koeficient bezpečnosti (1.4).

$$k = \frac{Rm}{\sigma_{red}} = \frac{195}{84} = 2,32 \doteq 2,3 \quad (1.3)$$

$$k = \frac{Rm}{\sigma_{red}} = \frac{140}{94} = 1,48 \doteq 1,5 \quad (1.4)$$

5.2 Vyhodnocení obecných postupů

Při testování stavebnicových systémů jsem postupoval tak, že jsem vytvořil analýzy v tomto pořadí: 1. sestavy, 2. jednotlivé díly, 3. spoje. Tento postup je použitelný pro jednodušší konfigurace, ale v sestavách s více komponenty bych na počátku analyzoval jednotlivé díly, poté spoje a až v konečné fázi celou sestavu, neboť v případě špatného výsledku u jednoho prvku, může být část, či celá sestava nefunkční. V těchto systémech je vhodné vyhodnocovat posuvy, napětí a koeficient bezpečnosti, neboť toto jsou základní veličiny pro analýzu tohoto typu.

Pro jednodušší modelování se dají použít i nosníkové prvky, ze kterých je u složitějších míst možno přejít na prvky jako shelly, či solidy, u kterých jsem schopni dosáhnout přesnějších výsledků.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo, metodou konečných prvků, udělat analýzu stavebnicového systému. V první kapitole jsem, pro bližší seznámení s tématem, prezentoval několika typů stavebnicových systémů, z nichž jsem pro analýzu zvolil schůdky. V druhé kapitole jsem se zabýval vytvořením modelu schůdků v programu Ansys. Vzhledem k tomu, že schůdky byly "vyrobeny" z tenkostěnného profilu a tenkého plechu, mohl jsem je modelovat jako shell. Dále jsem provedl analýzy dvou sestav, přičemž každou sestavu s jiným typem schodu a pro každou z nich jsem realizoval simulace pro tři vybrané zátěžové stavy. Z výsledků jsem vybral nejvíce namáhaný zátěžový stav a prezentoval jsem jeho výsledky. Následně jsem otestoval oba schody samostatně s pomocí výsledků sestav a reakce získané ze sestav jsem vložil do modelů jednotlivých schodů. Pro lepší uchycení byly schody vytvořeny pomocí symetrie. Submodel zatíženého spoje jsem již nakreslil jako solid. V simulaci submodelu bych spoj vytvořil pomocí kontaktů, díky čemuž bych dosáhl lepších výsledků, ale vzhledem k nedostatečným znalostem jsem tuto funkci nepoužil a spoj jsem vytvořil jen pomocí jointů.

Na počátku této práce zmiňuji dětské stavebnice, u kterých není třeba dělat pevnostní analýzy vzhledem k jejich funkci. Toto však neplatí pro lešení, či schůdky, u kterých je předpoklad bezpečného používání vzhledem k normám, praktické užitelnosti a v neposlední řadě ekonomickému hledisku. Tato práce by mohla sloužit jako ukázka toho, jak se dají tyto systémy počítat, ale doporučil bych postup, který jsem zmínil v kapitole 5.2, tj. na počátku analyzovat jednotlivé díly, poté spoje a až v konečné fázi celou sestavu.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jaroslavu Rojíčkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, odbornou pomoc a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Seznam použitých pramenů a literatury

- [1] ANSYS. [online] [vid. 5. května 2019]. Dostupný z <https://www.ansys.com>
- [2] ALFIX. [online] [vid. 15. dubna 2019]. Dostupný z <https://www.leseni-alfix.cz>
- [3] ALFUN a.s. [online] [vid. 27. dubna 2019]. Dostupný z <http://www.alfun.cz>
- [4] ALZA. [online] [vid. 15. dubna 2019]. Dostupný z <https://www.alza.cz>
- [5] ehlinik.cz. [online] [vid. 27. dubna 2019]. Dostupný z <https://www.ehlinik.cz>
- [6] LEGO. [online] [vid. 15. dubna 2019]. Dostupný z <https://www.lego.com/cs-cz>
- [7] LEINVEBER, J., 2017. *Strojnické tabulky*. Úvaly: Ambra – pedagogické nakladatelství. ISBN: 978-80-7361-081-4.
- [8] LENERT, J., 1998. *Pružnost a pevnost I*. VŠB-TU Ostrava. ISBN 80-7078-392-3.
- [9] LENERT, J., 1998. *Pružnost a pevnost II*. VŠB-TU Ostrava. ISBN 80-7078-572-1.
- [10] MERKUR. [online] [vid. 15. dubna 2019]. Dostupný z <http://www.merkurtoys.cz>
- [11] MERKUR PO KRETÉNSKU. [online] [vid. 18. dubna 2019]. Dostupný z <http://merkur.kreteni.cz>
- [12] PARDEL, T., 1983. *Obecná psychologie*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství. ISBN: 14-393-83.
- [13] SLAVÍK, M., 2012. *Vysokoškolská pedagogika – Pro odborné vzdělávání*. Havlíčkův Brod: Grada Publishing, a.s. ISBN 978-80-247-4054-6.
- [14] Stavebnice. [online] [vid. 15. dubna 2019]. Dostupný z https://stavebnice.org/683-superlarge_default/stavebnice-seva-5-technic.jpg
- [15] STAVEBNICE SEVA. [online] [vid. 15. dubna 2019]. Dostupný z <https://www.stavebniceseva.cz/STAVEBNICE-SEVA>
- [16] VAZACI-TECHNIKA.CZ. [online] [vid. 27. dubna 2019]. Dostupný z <http://www.vazaci-technika.cz>

Technické dokumenty

- [17] ČSN EN 131-1
- [18] ČSN EN 131-2

Seznam tabulek

Tabulka 2.1	-	Rozměry sestavy
Tabulka 2.2	-	Délka nohy
Tabulka 2.3	-	Rozměry schodu do 120 kg
Tabulka 2.4	-	Rozměry schodu do 150 kg
Tabulka 2.5	-	Vlastnosti hliníku
Tabulka 2.6	-	Definice pružiny
Tabulka 2.7	-	Složky napětí
Tabulka 2.8	-	Vlastnosti meshe
Tabulka 2.9	-	Výsledky posuvů sestavy
Tabulka 2.10	-	Redukované napětí sestavy
Tabulka 2.11	-	Reakce v pružinách
Tabulka 3.1	-	Reakce v sestavě
Tabulka 3.2	-	Složky síly
Tabulka 3.3	-	Výsledky posuvů
Tabulka 3.4	-	Reakce v sestavě
Tabulka 3.5	-	Složky síly
Tabulka 3.6	-	Výsledky posuvů
Tabulka 4.1	-	Mesh

Seznam obrázků

- Obrázek 1.1 - Základní díly stavebnice SEVA
- Obrázek 1.2 - Jeřáb
- Obrázek 1.3 - Stavebnicové díly MERKUR
- Obrázek 1.4 - Model portálového přístavního jeřábu
- Obrázek 1.5 - Kostky stavebnice LEGO
- Obrázek 1.6 - Produkt stavebnice LEGO
- Obrázek 1.7 - Spojování konstrukce
- Obrázek 1.8 - Modelová řada lešení Alfix
- Obrázek 1.9 - Schůdky
- Obrázek 2.1 - Schůdky
- Obrázek 2.2 - Profil
- Obrázek 2.3 - Noha schůdků
- Obrázek 2.4 - Schod do 120 kg
- Obrázek 2.5 - Schod do 150 kg
- Obrázek 2.6 - Popruh
- Obrázek 2.7 - Spojení schodu a nohy
- Obrázek 2.8 - Spojení dvou nohou
- Obrázek 2.9 - Pružina
- Obrázek 2.10 - Uchycení schůdků
- Obrázek 2.11 - Zatěžovací stavy
- Obrázek 2.12 - Konvergence
- Obrázek 2.13 - Posuvy v ose X
- Obrázek 2.14 - Posuvy v ose Z
- Obrázek 2.15 - Redukované napětí sestavy
- Obrázek 2.16 - Redukované napětí detail A
- Obrázek 2.17 - Redukované napětí detail B
- Obrázek 2.18 - Redukované napětí na nohou
- Obrázek 3.1 - Tvar schodu do 120 kg
- Obrázek 3.2 - Reakce v sestavě
- Obrázek 3.3 - Vetknutí
- Obrázek 3.4 - Působící síla

- Obrázek 3.5 - Reakční síla
- Obrázek 3.6 - Posuvy v ose X
- Obrázek 3.7 - Napětí na boku schodu
- Obrázek 3.8 - Napětí na horní straně schodu
- Obrázek 3.9 - Napětí v otvoru pro připevnění
- Obrázek 3.10 - Tvar schodu do 150 kg
- Obrázek 3.11 - Reakce v sestavě
- Obrázek 3.12 - Vetknutí
- Obrázek 3.13 - Působící síla
- Obrázek 3.14 - Reakční síla
- Obrázek 3.15 - Posuvy v ose X
- Obrázek 3.16 - Napětí na boku schodu
- Obrázek 3.17 - Napětí na vrchu schodu
- Obrázek 3.18 - Napětí v otvoru pro připevnění
- Obrázek 4.1 - Výřez
- Obrázek 4.2 - Vložené posuvy do vyřezaných míst
- Obrázek 4.3 - Joint
- Obrázek 4.4 - Mesh
- Obrázek 4.5 - Napětí na výřezu
- Obrázek 4.6 - Napětí na spoji
- Obrázek 4.7 - Napětí na noze
- Obrázek 4.8 - Napětí na otvoru v noze
- Obrázek 4.9 - Napětí na schodu
- Obrázek 4.10 - Napětí na otvoru ve schodu